

A close-up, blue-tinted photograph of a person's eyes, looking slightly to the right. The image is partially obscured by a dark blue rounded rectangle containing the title.

Photobiologische Sicherheit von Licht emittierenden Dioden (LED)

L. Udovičić, F. Mainusch, M. Janßen, D. Nowack, G. Ott

**Forschung
Projekt F 2115**

L. Udovičić
F. Mainusch
M. Janßen
D. Nowack
G. Ott

**Photobiologische Sicherheit von
Licht emittierenden Dioden (LED)**

Dortmund/Berlin/Dresden 2013

Diese Veröffentlichung ist der Abschlussbericht zum Projekt „Messverfahren zur Risikobewertung von Licht emittierenden Dioden (LED)“ – Projekt F 2115 – der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin.

Autoren: Dr. rer. nat. Ljiljana Udovičić
Florian Mainusch
Dipl.-Ing. Marco Janßen
Dennis Nowack
Dipl.-Ing. Günter Ott
Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin

Titelfoto: Dipl.-Ing. Marco Janßen
Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin

Umschlaggestaltung: Rainer Klemm
Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin

Herstellung: Bonifatius GmbH, Paderborn

Herausgeber: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin
Friedrich-Henkel-Weg 1 – 25, 44149 Dortmund
Telefon 0231 9071-0
Fax 0231 9071-2454
poststelle@buaa.bund.de
www.buaa.de

Berlin:
Nöldnerstr. 40 – 42, 10317 Berlin
Telefon 030 51548-0
Fax 030 51548-4170

Dresden:
Fabricestr. 8, 01099 Dresden
Telefon 0351 5639-50
Fax 0351 5639-5210

Alle Rechte einschließlich der fotomechanischen Wiedergabe und des auszugsweisen Nachdrucks vorbehalten.



www.buaa.de/dok/3669094

ISBN 978-3-88261-726-9

Inhaltsverzeichnis

	Seite
Kurzreferat	7
Abstract	8
1 Einleitung	9
2 Licht emittierende Dioden	11
2.1 Physikalische Grundlagen	11
2.2 Eigenschaften der LED	15
2.3 LED-Typen	16
2.4 LED-Anwendungen	17
3 Wirkung optischer Strahlung auf den Menschen	20
3.1 Schädigende Wirkungen optischer Strahlung	23
3.1.1 Gefährdungen der Augen	24
3.1.2 Gefährdungen der Haut	27
4 Relevante messtechnische Größen für die Gefährdungsbeurteilung inkohärenter optischer Strahlung	29
4.1 Geometrische Größen	29
4.1.1 Winkelausdehnung der Quelle α	29
4.1.2 Empfangswinkel γ	30
4.2 Radiometrische und photometrische Größen	31
5 Gesetzliche Regelungen bezüglich inkohärenter optischer Strahlung	35
5.1 Arbeitsschutzverordnung zu künstlicher optischer Strahlung (OStrV)	35
5.2 Europäische Richtlinie „Künstliche optische Strahlung“	37
5.2.1 Expositionsgrenzwerte für inkohärente optische Strahlung	39
5.2.1.1 Aktinische UV-Gefährdung der Augen und der Haut	39
5.2.1.2 Gefährdung der Augen im UV-A-Spektralbereich	40
5.2.1.3 Photochemische Netzhautgefährdung (Blaulichtgefährdung)	41
5.2.1.4 Photochemische Netzhautgefährdung - kleine Quelle	42
5.2.1.5 Thermische Netzhautgefährdung	43
5.2.1.6 Thermische Netzhautgefährdung - schwacher visueller Reiz	45
5.2.1.7 IR-Gefährdung der Augen	46
5.2.1.8 Thermische Gefährdung der Haut	46
6 Bewertung der photobiologischen Sicherheit von LED nach der Lampensicherheitsnorm DIN EN 62471	51
6.1 Messung der Bestrahlungsstärke	57
6.2 Messung der Strahldichte	59
6.2.1 Grundlegendes zur Strahldichtemessung	59
6.2.2 Messvorgang zur Messung der Strahldichte	61
6.2.2.1 Standardmethode	61

6.2.2.2	Alternative Methode	62
6.3	Messung der Quellengröße	64
6.4	Messabstand	64
6.5	Messgeräte	64
6.6	Experimenteller Teil	66
6.6.1	Experimentelle Methoden	66
6.6.2	Experimenteller Aufbau für Messungen der Bestrahlungsstärke	67
6.6.3	Experimenteller Aufbau für Messungen der Strahldichte	67
6.6.4	Messungen der Beleuchtungsstärke	67
6.6.5	Experimenteller Aufbau für Messungen der Quellengröße	70
6.6.6	Messbedingungen	70
7	Ergebnisse	71
7.1	LED im sichtbaren Spektralbereich	71
7.1.1	Weißlicht emittierende LED HP 803 NW (Roithner)	72
7.1.1.1	Bestimmung der Risikogruppe bezüglich der photochemischen und der thermischen Netzhautgefährdung - Standardmethode	72
7.1.1.2	Bestimmung der Risikogruppe bezüglich der photochemischen Netzhautgefährdung - kleine Quelle (alternative Methode)	75
7.1.2	Blaulich emittierende LED LD W5AP (OSRAM)	77
7.1.2.1	Bestimmung der Risikogruppe bezüglich der photochemischen und der thermischen Netzhautgefährdung	77
7.1.3	Rotlicht emittierende LED ELS (Roithner)	79
7.1.3.1	Bestimmung der Risikogruppe bezüglich der photochemischen und der thermischen Netzhautgefährdung	79
7.2	LED im UV-Spektralbereich: UV-LED 365 (Seoul)	81
7.2.1	Bestimmung der Risikogruppe bezüglich der aktinischen UV-Gefährdung	81
7.2.2	Bestimmung der Risikogruppe bezüglich der UV-A-Gefährdung der Augen	81
7.2.3	Bestimmung der Risikogruppe bezüglich der photochemischen Netzhautgefährdung	82
7.3	LED im IR-Spektralbereich: IR-LED SFH 4230 (OSRAM)	83
7.3.1	Bestimmung der Risikogruppe bezüglich der thermischen Netzhautgefährdung - schwacher visueller Reiz	83
7.3.2	Bestimmung der Risikogruppe bezüglich der IR-Gefährdung der Augen	85
8	Zusammenfassung und Ausblick	86
	Literaturverzeichnis	91
	Tabellenverzeichnis	98
	Abbildungsverzeichnis	104
	Danksagung	111

Anhang A: Messung der Quellengröße	112
Anhang B: Messergebnisse untersuchter LED	115
B1 LED Golden Dragon ohne Linse (OSRAM)	115
B2 LED Golden Dragon mit Linse (OSRAM)	123
B3 LED Golden Dragon Plus (OSRAM)	133
B4 LED Platinum Dragon (OSRAM)	143
B5 LED Diamond Dragon (OSRAM)	151
B6 LED Oslux (OSRAM)	163
B7 LED ELS (Roithner)	165
B8 LED HP 803 (Roithner)	171
B9 Z-Power-LED P7 (Seoul)	175
B10 LED-Taschenlampen (Zweibrüder)	178
B11 LED-Lampen MR-16, 3 W (Omnilux)	184
B12 LED-Reflektor 3 W (Paulmann)	194

Photobiologische Sicherheit von Licht emittierenden Dioden (LED)

Kurzreferat

Fünzig Jahre nach ihrer Erfindung erobern Licht emittierende Dioden (LED) immer mehr Anwendungen und halten zunehmend Einzug sowohl im beruflichen als auch im privaten Bereich. Da die rasanten Fortschritte der LED-Technologie zu immer leistungsstärkeren LED führen, stellt sich aus Sicht des Arbeitsschutzes die Frage nach der photobiologischen Sicherheit von LED. Welche Richtlinien und Normen sind bei der Bewertung zu beachten?

Bei der Beurteilung der Sicherheit von Beschäftigten an Arbeitsplätzen mit LED ist die Europäische Richtlinie 2006/25/EG über künstliche optische Strahlung zu berücksichtigen, in der Mindestvorschriften und Expositionsgrenzwerte zum Schutz von Augen und Haut festgelegt sind, und die mit einer Verordnung zum Schutz der Beschäftigten vor Gefährdungen durch künstliche optische Strahlung (OStrV) in nationales Recht umgesetzt wurde. Die erforderlichen Messverfahren und die Berechnungsmethodik sind in der harmonisierten Norm DIN EN 62471:2009 „Photobiologische Sicherheit von Lampen und Lampensystemen“ festgelegt. Die Norm unterteilt die Quellen inkohärenter optischer Strahlung (wie Glüh-, Leuchtstofflampen, LED, usw.) in vier Risikogruppen: in die Freie Gruppe (keine photobiologische Gefährdung) und in die Risikogruppen 1 bis 3 mit steigendem Gefährdungspotential.

Dieser Bericht stellt die Ergebnisse der Bewertung photobiologischer Sicherheit unterschiedlicher LED nach den Bestimmungen der Lampensicherheitsnorm vor. Dabei wurden überwiegend LED im sichtbaren Spektralbereich untersucht. Beispielhaft wurde je eine LED, die im ultravioletten bzw. infraroten Spektralbereich emittiert, beurteilt. Die untersuchten LED im sichtbaren Spektralbereich (34 einzelne LED mit oder ohne Linse, drei LED-Taschenlampen, fünf LED-Lampen, ein LED-Reflektor) erreichten maximal die Risikogruppe 2 aufgrund der Überschreitung der Emissionsgrenzwerte für photochemische Netzhautschädigung: Die photochemische Netzhautgefährdung durch LED ist die dominierende Gefährdung im sichtbaren Spektralbereich. Keiner der Emissionsgrenzwerte für thermische Netzhautgefährdung wurde überschritten.

Bei fast allen LED, bei denen die Emissionsgrenzwerte der Freien Gruppe überschritten wurden, handelte es sich um Weiß- oder Blaulicht emittierende LED (Ausnahme: eine Grünlicht emittierende LED). Der Expositionsgrenzwert für die photochemische Netzhautgefährdung bei einem langzeitigen, absichtlichen Blick aus kurzer Distanz in eine Weiß- oder Blaulicht emittierende LED kann schon nach 10 Sekunden überschritten werden. Die Summe der Einzelexpositionen kann diese Zeit an bestimmten Arbeitsplätzen (z. B. in der LED-Industrie, bei der Installation von Beleuchtungsanlagen, in der Theater- und Bühnenbeleuchtung) rasch übersteigen.

Schlagwörter:

Licht emittierende Dioden, LED, Lampensicherheitsnorm, künstliche optische Strahlung, photobiologische Sicherheit, photobiologische Gefährdung, Risikogruppe

Photobiological safety of light emitting diodes (LEDs)

Abstract

Fifty years after their invention, light emitting diodes (LEDs) are conquering more and more applications and are increasingly being used in both professional and private spheres. From an occupational health and safety perspective, since the rapid progress of LED-technology leads to ever more powerful LEDs, the question of their photobiological safety arises. Which directives and standards are to be observed in carrying out the risk assessment?

In assessing the safety of employees at workplaces with LEDs, the European Directive 2006/25/EC on artificial optical radiation has to be considered. This Directive sets out the minimum requirements and exposure limit values in order to protect the eyes and skin of employees against risks arising from artificial optical radiation and is implemented into German national law by the Ordinance on artificial optical radiation (OStrV). The required measurement methods and the calculation methodology are set in the harmonized standard DIN EN 62471:2009 „Photobiological safety of lamps and lamp systems“. The standard divides the sources of incoherent optical radiation (such as incandescent and fluorescent lamps, LEDs, etc.) into four groups: in the Exempt Group (no photobiological risk) and the Risk Groups 1 to 3 with increasing hazard potential.

This report presents the results of the photobiological safety evaluation of different LEDs following the requirements of the Lamp Safety Standard. Predominantly, LEDs in the visible spectrum were studied. As an example only two LEDs that emit in the ultraviolet and in the infrared spectral region were assessed. Due to exceeding the emission limit value for photochemical retinal damage the examined LEDs in the visible spectrum (34 single LEDs with or without lens, three LED torches, five LED lamps, one LED reflector) have reached the Risk Group 2 at most. None of the emission limit values for thermal retinal hazard has been exceeded. Hence, the photochemical retinal hazard is the dominant threat by LEDs in the visible spectrum.

Almost all LEDs which exceeded the emission limit value of the Exempt Group were white or blue LEDs (except for one green LED). During a deliberate long-term close-distance look into a white or blue LED, the exposure limit value for photochemical retinal hazard can be exceeded in only 10 seconds. The sum of single exposures at certain workplaces (such as the LED industry, the installation of lighting systems or the theater and stage lighting) can exceed this time rapidly.

Key words:

light emitting diodes, LED, Lamp Safety Standard, artificial optical radiation, photobiological safety, photobiological hazard, risk group

1 Einleitung

Die erste Licht emittierende Diode, kurz LED von *Light Emitting Diode*, wurde von Nick Holonyak im Jahr 1962 [23] entwickelt. Diese rote, schwach leuchtende LED eröffnete damals eine neue Ära der Lichterzeugung. Andere Farben - grün, gelb und orange - kamen erst zehn Jahre später dazu. Noch länger, bis in die 90er Jahre des zwanzigsten Jahrhunderts, dauerte es, bis Shuji Nakamura [37] eine effiziente, im blauen Spektralbereich emittierende LED entwickelte. Kurz danach wurden auch Weißlicht-LED hergestellt. In den vergangenen Jahrzehnten hat sich auch die LED-Effizienz stetig verbessert, und aus ursprünglich schwach leuchtenden LED wurden helle Lichtquellen. Heute, fünfzig Jahre nach Erfindung der LED, werden diese dank ihres geringen Energieverbrauchs und der langen Lebensdauer allgemein als „Lichtquelle der Zukunft“ bezeichnet. Nicht nur in der Beleuchtung, in vielen anderen Bereichen wie der Automobilindustrie, in der Medizintechnik oder bei der Freiraum-Datenübertragung sind LED derzeit auf dem Vormarsch.

Die großen technologischen Fortschritte der letzten Jahre haben zu leistungsstarken LED geführt. Angesichts dieser Entwicklung stellt sich aus Sicht des Arbeitsschutzes die Frage nach ihrer photobiologischen Sicherheit, d. h. ob die von LED ausgehende optische Strahlung eine Gefährdung für die Augen und die Haut der Beschäftigten darstellen kann. Generell kann optische Strahlung im Übermaß die Augen und die Haut der Menschen schädigen. Um Arbeitnehmer davor zu schützen, hat die Europäische Kommission die EU-Richtlinie 2006/25/EG über künstliche optische Strahlung [49] verabschiedet, in der sie Mindestvorschriften und Expositionsgrenzwerte zum Schutz von Augen und Haut festlegt. Diese Richtlinie wurde im Jahr 2010 mit einer Verordnung zum Schutz der Beschäftigten vor Gefährdungen durch künstliche optische Strahlung (OStrV) [65] in nationales Recht umgesetzt. Die Verordnung verpflichtet Arbeitgeber, an Arbeitsplätzen mit künstlicher optischer Strahlung eine Gefährdungsbeurteilung durchzuführen. Herstellerdaten können eine Unterstützung bei der Einschätzung der Gefährdung und Festlegung der Schutzmaßnahmen bieten. Lässt sich anhand dieser Informationen nicht sicher feststellen, ob die Expositionsgrenzwerte eingehalten werden oder wenn die Herstellerdaten nicht vorhanden sind, ist eine Messung und Berechnung notwendig. Die erforderlichen Messverfahren und die Berechnungsmethodik sind in den dafür erarbeiteten europäischen Normen beschrieben.

Hinsichtlich ihrer physikalischen Eigenschaften stehen LED zwischen Lasern und Quellen inkohärenter optischer Strahlung¹. Diese Tatsache hatte auch Konsequenzen für die Beurteilung der photobiologischen Sicherheit von LED, die seit Anfang der 90er Jahre nach der Lasersicherheitsnorm IEC 60825 erfolgte. Es stellte sich allerdings heraus, dass das Messverfahren nach der Lasersicherheitsnorm zu überkritischen Ergebnissen bei der Bewertung der photobiologischen Sicherheit von LED führen konnte. Deswegen wurden in der Lasersicherheitsnorm IEC 60825-1:2007 [25], die in die nationale deutsche Norm DIN EN 60825-1:2008 [12] übernommen wurde, LED ausdrücklich von dieser Norm ausgenommen. Die photobiologische Sicherheit von LED wird stattdessen gemeinsam mit Lampen und Lampensystemen anhand der Norm DIN EN 62471:2009 [15] bewertet. Eine Ausnahme stel-

¹ Inkohärente optische Strahlung ist jede optische Strahlung außer Laserstrahlung.

len derzeit die LED in der Lichtwellenleitertechnik und Infrarot-LED zur Freiraum- Informationsübertragung dar [1, 13, 14].

Da die Bewertung der photobiologischen Sicherheit von LED anhand einer Norm durchzuführen ist, die sich in erster Linie auf Lampen bezieht, stellte sich die Frage, welche besonderen Aspekte dabei zu beachten sind, und ob es möglich ist, die vorgeschriebenen Messverfahren zu vereinfachen. Zur Beantwortung dieser Fragen wurde in der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA) ein Entwicklungsprojekt mit dem Titel „Messverfahren zur Risikobewertung von Licht emittierenden Dioden (LED)“ durchgeführt. Der vorliegende Bericht stellt die Ergebnisse dieses Projektes dar.

Der Bericht gliedert sich wie folgt: Zunächst werden in Kapitel 2 die physikalischen Grundlagen und Eigenschaften der LED dargestellt. Darüber hinaus werden einige LED-Typen und Anwendungsbereiche beschrieben. Die Wirkung optischer Strahlung auf den Menschen ist vielfältig und kann eine Reihe von positiven, aber auch negativen Effekten hervorrufen. Wirkungsmechanismen optischer Strahlung und die Schädigungen, die durch Einwirkung optischer Strahlung entstehen können, werden in Kapitel 3 erläutert.

Für das Verständnis der Beurteilung der photobiologischen Sicherheit der LED ist die Kenntnis einiger geometrischer Größen sowie Definitionen und Beziehungen aus der Radiometrie und der Photometrie erforderlich, die in Kapitel 4 zu finden sind. In Kapitel 5 werden die für LED relevanten gesetzlichen Regelungen erläutert und die Expositionsgrenzwerte für inkohärente Quellen optischer Strahlung dargestellt.

Die Bewertung der photobiologischen Sicherheit von LED nach der Lampensicherheitsnorm wird im Kapitel 6 erläutert. Hier werden die Anforderungen der Lampensicherheitsnorm DIN EN 62471 und die Risikogruppenklassifizierung anhand der in der Norm angegebenen Emissionsgrenzwerte beschrieben. Im gleichen Kapitel werden experimentelle Messaufbauten dargestellt. Die Messergebnisse repräsentativer LED werden in Kapitel 7 vorgestellt, eine vollständige Darstellung sämtlicher im Rahmen des Projektes untersuchter LED ist im Anhang B zu finden. In Kapitel 8 werden schließlich die Ergebnisse dieses Projektes zusammengefasst.

2 Licht emittierende Dioden

2.1 Physikalische Grundlagen

Ein LED-Chip besteht aus zwei aneinandergrenzenden Halbleiter-Schichten, die ein Kristallgitter bilden. Die Schichten sind derart mit Fremdatomen versetzt („dotiert“), dass sich in der einen ein Elektronenüberschuss („n-dotierte Halbleiter“), in der anderen ein Elektronenmangel („p-dotierte Halbleiter“) ausbildet. Wenn an die Grenzschicht („pn-Übergang“) eine äußere Spannung in Durchlassrichtung angelegt wird (die p-dotierte Schicht mit einem Pluspol und die n-dotierte Schicht mit einem Minuspol verbunden), wandern Elektronen aus der n-dotierten Schicht in Richtung Pluspol, also zur p-dotierten Schicht, und es kommt zur Besetzung der Leerstellen. Die bei diesem Vorgang, auch Rekombination genannt, frei werdende Energie wird als optische Strahlung abgegeben. Da die p-dotierte Schicht sehr dünn ist, kann die optische Strahlung entweichen. Heutige LED-Chips sind allerdings viel komplizierter aufgebaut als der hier beschriebene und in Abbildung 2.1 schematisch dargestellte Aufbau. Weil die Effizienz, also der Wirkungsgrad der Umwandlung von elektrischer in optische Leistung einer solch einfachen LED-Struktur sehr begrenzt ist, enthalten moderne, hocheffiziente LED-Chips mehrere, nur wenige Nanometer dünne Halbleiterschichten [31].

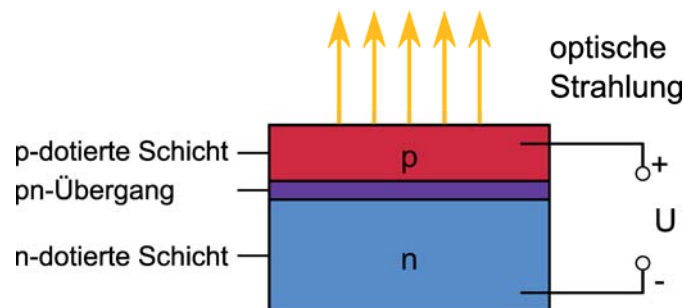


Abb. 2.1 Schematischer Aufbau eines LED-Chips

Eine LED ist ein etwa 1 mm^2 großer LED-Chip, der mit elektrischen Anschlüssen verbunden ist. Ihre Abstrahlcharakteristik umfasst den gesamten Halbraum. Meistens sind LED allerdings mit einem Kunststoff bedeckt (Abbildung 2.2). Der Kunststoffkörper dient zum einen als Schutz vor Umwelteinflüssen, zum anderen wirkt die gekrümmte Oberfläche als optische Linse und bündelt die Strahlung in Achsrichtung.

Mit heutigen LED sind Wellenlängen vom ultravioletten (UV), über den sichtbaren (Licht) bis zum infraroten (IR) Spektralbereich optischer Strahlung erzielbar. Die Definition der Spektralbereiche zeigt Tabelle 2.1. Eigentlich sollte der Ausdruck „LED“ nur für Halbleiterquellen verwendet werden, die optische Strahlung im sichtbaren Spektralbereich emittieren. Halbleiterquellen, die Strahlung im ultravioletten bzw. im infraroten Spektralbereich emittieren, werden als UVED (von **U**ltraviolet **E**mitting **D**iode) bzw. IRED (von **I**nfra-**R**ed **E**mitting **D**iode) bezeichnet. In diesem Bericht wird der Begriff „LED“ stellvertretend auch für diese beiden Gruppen verwendet.

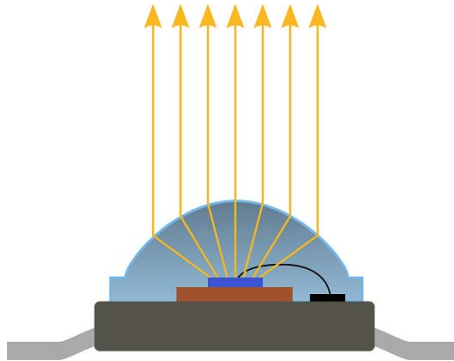


Abb. 2.2 Schematischer Aufbau einer LED und die Strahlbündelung durch eine vorgeschaltete Linse

Tab. 2.1 Spektralbereiche der optischen Strahlung. Optische Strahlung ist elektromagnetische Strahlung im Wellenlängenbereich von 100 nm bis 1 mm. Das Spektrum der optischen Strahlung wird unterteilt in ultraviolette Strahlung (UV-Strahlung), sichtbare Strahlung und infrarote Strahlung (IR-Strahlung). Je kürzer die Wellenlänge, umso energiereicher ist die emittierte optische Strahlung.

Spektralbereich	Wellenlänge/nm
Ultraviolett C (UV-C)	100 bis 280
Ultraviolett B (UV-B)	280 bis 315
Ultraviolett A (UV-A)	315 bis 400
Sichtbar (Licht) ²	380 bis 780
Infrarot A (IR-A)	780 bis 1 400
Infrarot B (IR-B)	1 400 bis 3 000
Infrarot C (IR-C)	3 000 bis 1 000 000

Bei LED wird die Wellenlänge der erzeugten optischen Strahlung durch die gezielte Auswahl der Halbleitermaterialien und deren Dotierung variiert [31]. Hierbei kommen verschiedene Halbleitermaterialien zum Einsatz. So wird z. B. mit Materialien auf der Basis von Aluminium-Indium-Gallium-Nitrid (AlInGaN) optische Strahlung im nahen UV-, blauen und grünen Spektralbereich erzeugt, mit Materialien auf der Basis von Aluminium-Indium-Gallium-Phosphid (AlInGaP) optische Strahlung im grünen, gelben und roten Spektralbereich. Mit Aluminium-Gallium-Arsenid (AlGaAs) erzielt man optische Strahlung mit Wellenlängen im roten und IR-Spektralbereich bis 1 000 nm.

² Es gibt keine genauen Grenzen zwischen dem sichtbaren und dem UV-, bzw. IR-Spektralbereich, da diese von der Augenempfindlichkeit des Beobachters und der Strahlungsleistung, die die Netzhaut erreicht, abhängen. Die untere Grenze wird im Allgemeinen zwischen 360 nm und 400 nm, die obere Grenze zwischen 760 nm und 830 nm angenommen.

Die Effizienz für die Konversion von elektrischer zu optischer Leistung hängt für LED aus AlInGaN und AlInGaP stark von der Wellenlänge ab [31, 54]. Bei Wellenlängen größer als 630 nm liegt die Effizienz von AlInGaP-basierten LED bei über 50 %, zu kürzeren Wellenlängen hin nimmt sie jedoch drastisch ab und liegt bei 560 nm unter 1 % (Abbildung 2.3). Auch bei dem AlInGaN-System hängt die Effizienz stark von der Wellenlänge ab, allerdings mit gegenläufigem Trend zu AlInGaP, d. h. sie steigt von langen zu kurzen Wellenlängen hin an. Daher lassen sich mit keinem der beiden Materialien effiziente grün-gelb emittierende LED herstellen.

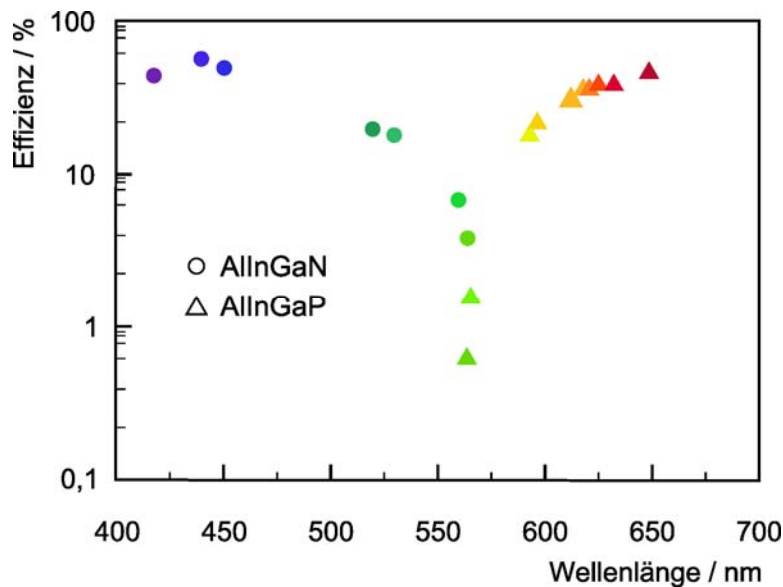


Abb. 2.3 Die Effizienz für die Konversion von elektrischer zu optischer Leistung (nach [31])

Für farbige LED ist es charakteristisch, dass sie optische Strahlung in einem schmalen Wellenlängenbereich mit spektralen Bandbreiten („Halbwertsbreiten“) von 15 nm bis 35 nm emittieren. Abbildung 2.4 zeigt typische LED-Spektren. Um mit LED weißes Licht zu erzeugen, besteht der direkte Ansatz darin, je eine rot-, grün- und blau-emittierende LED (RGB-LED) zu verwenden und die entsprechenden Helligkeiten so zu wählen, dass ein weißer Farbeindruck entsteht (Multichip LED). Das menschliche Auge nimmt nämlich Farben über drei unterschiedliche Typen von lichtempfindlichen Sinneszellen, die sogenannten Zapfen, wahr (siehe Kapitel 3). Das Maximum ihrer Empfindlichkeit befindet sich in verschiedenen Spektralbereichen. Stimuliert eine LED alle drei Photorezeptortypen ungefähr gleich stark, wird ihre emittierte Strahlung als weiß wahrgenommen.

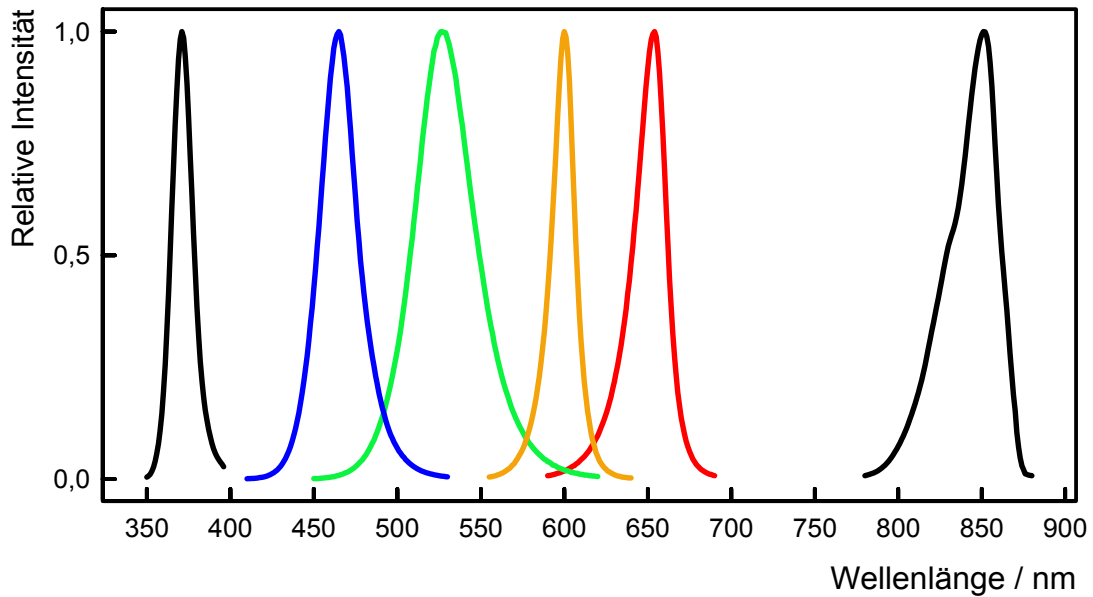


Abb. 2.4 Typische LED-Spektren

Bei einer anderen, am weitesten verbreiteten Vorgehensweise, wird eine blau-emittierende LED mit Leuchtstoffen (Phosphoren) beschichtet, wie z. B. mit einem gelb-emittierenden Cer-dotierten Yttrium-Aluminium-Granat (YAG). Solche LED werden als pcLED (von *phosphor coated LED*) bezeichnet. Dabei regt das Licht der blau-emittierenden LED den Leuchtstoff zur Fluoreszenz an. Aus der direkten Emission der blau-emittierenden LED (Maximum bei etwa 460 nm) und der Fluoreszenz des Leuchtstoffes (Maximum bei etwa 550 nm) entsteht weißes Licht (Abbildung 2.5). Die deutlich höhere spektrale Linienbreite der Fluoreszenz ermöglicht es, sowohl die grün- als auch die rot empfindlichen Photorezeptoren zu stimulieren, sodass zusammen mit dem blauen Licht die Emission weiß erscheint.

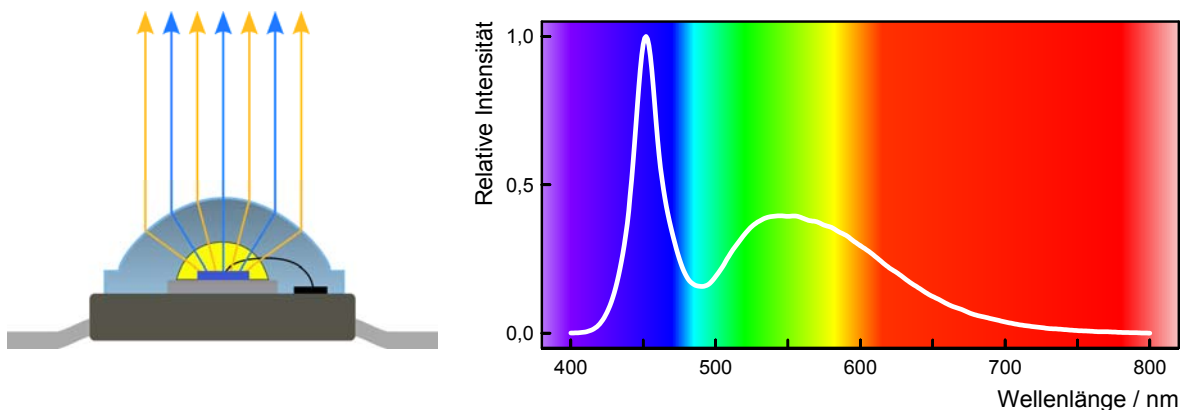


Abb. 2.5 Weißlicht emittierende LED: Das Licht einer Blaulicht emittierenden LED regt Leuchtstoffe an. Weißlicht emittierende LED besitzt neben dem breiten Spektralbereich des Leuchtstoffes einen schmalbandigen blauen Lichtanteil.

Durch Anwendung verschiedener Leuchtstoffe lassen sich Weißlicht emittierende LED für Farbtemperaturen zwischen etwa 2 500 K und 10 000 K fertigen. Eine höhere Farbtemperatur bedeutet, dass die Lichtquelle blauer erscheint und „kalt“ wirkt. Licht mit einer niedrigeren Farbtemperatur hat höhere Rotlichtanteile und wird als „warm“ empfunden. Eine Farbtemperatur unter 3 300 K wird als „warmweiß“ bezeichnet, eine Farbtemperatur von 3 300 K bis 5 000 K entspricht dem „neutralweiß“, und über 5 000 K werden die Begriffe „tageslichtweiß“ oder „kaltweiß“ verwendet [59].

Neben herkömmlichen, anorganischen Halbleitern werden seit einigen Jahren auch organische Verbindungen zur Herstellung von flächigen LED genutzt, man spricht dann von OLED (von *Organic Light Emitting Diodes*). OLED haben geringe abgestrahlte Leistung pro Fläche und waren nicht Gegenstand dieses Projektes.

2.2 Eigenschaften der LED

Seit der Entwicklung der ersten LED wurde ihre Lichtausbeute³ um ungefähr drei Größenordnungen gesteigert - von unter 0,1 lm/W im Jahr 1962 bis etwa 100 lm/W bei kaltweißen LED im Jahr 2010. In der Forschung wurden bereits höhere Lichtausbeuten erreicht. Die Firma Nichia berichtete im September 2010 über den Laborbetrieb eines LED-Chips mit 183 lm/W bei einer Stromstärke von 350 mA und einer Farbtemperatur von 4 700 K [38].

Für die Lichtqualität der LED spielt auch die Farbwiedergabe eine wichtige Rolle. Der Farbwiedergabeindex wird definiert als die Fähigkeit einer Lichtquelle, Farben von Gegenständen korrekt wiederzugeben. Je höher der Farbwiedergabeindex, umso natürlicher und angenehmer empfindet das menschliche Auge die Farben. Eine konventionelle Glühlampe erreicht fast den maximalen Wert von 100, während Energiesparlampen deutlich schlechtere Farbwiedergabewerte zwischen 70 und 90 haben. Multichip LED erreichen Farbwiedergabeindizes zwischen 20 und 60, während die Kombination mehrerer Leuchtstoffe Farbwiedergabeindizes zwischen 80 und 90 ermöglicht. Mit einem neuen Ansatz, der den Multichip LED mit dem pcLED verbindet, lassen sich warmweiße LED mit Lichtausbeuten von mehr als 110 lm/W und einem Farbwiedergabeindex von mehr als 90 herstellen [67]. Hier wird eine rote LED mit einer weißen LED, die einen grüngelben Leuchtstoff beinhaltet, kombiniert.

LED besitzen eine exponentiell ansteigende Strom-Spannungs-Kennlinie, die unter anderem auch von der Temperatur abhängt [29]. Nach Anlegen der Durchlassspannung steigt die Stromstärke schnell an, und die LED erwärmt sich bei dem gleichzeitigen Anstieg der Verluste. Da warme Halbleiter besser leiten als kalte, kommt es trotz konstant gehaltener Durchlassspannung zum weiteren Stromanstieg. Das führt dazu, dass sich die LED erhitzt und oberhalb einer Temperatur von etwa 150°C das Kristallgitter des Halbleiters zerstört wird. Aus diesem Grund betreibt man LED mit einer konstanten Stromstärke, idealerweise mit einer Konstantstromquelle.

³ Quotient aus dem von der Strahlungsquelle ausgesandten Lichtstrom in Lumen (lm) und der von der Strahlungsquelle verbrauchten elektrischen Leistung in Watt (W) - siehe Kapitel 4.

Wie oben erwähnt, bewirkt eine höhere Stromstärke eine erhöhte Wärmeentwicklung. Durch thermische Einflüsse kommt es zur Vergrößerung von Fehlstellen im Kristall, die in der Folge nicht mehr zur Lichterzeugung beitragen. Deswegen ist es notwendig, die entstehende Wärme abzuführen. Die LED werden dazu auf Materialien mit hoher Wärmeleitfähigkeit aufgebracht oder zusätzlich durch Kühlkörper gekühlt. Das Thermomanagement bei Hochleistungs-LED (LED, die mit Stromstärken oberhalb von 200 mA betrieben werden) ist von größter Bedeutung.

Als Lebensdauer einer LED wird die Zeit bezeichnet, nach der die Lichtausbeute auf die Hälfte des Anfangswertes abgesunken ist. Dabei werden die LED nach und nach schwächer, fallen aber in der Regel nicht plötzlich aus. Die Lebensdauer hängt vom jeweiligen Halbleitermaterial und den Betriebsbedingungen ab. Hohe Temperaturen verkürzen die Lebensdauer und verringern die Lichtleistung der LED beträchtlich. Die Lebensdauer von LED reicht von einigen tausend Stunden bis zu über 50 000 Stunden bei LED, die mit niedrigen Stromstärken betrieben werden [29].

2.3 LED-Typen

LED werden in verschiedenen, dem Einsatzzweck angepassten Bauformen angeboten. Beim ältesten, dem T-Typ (Abbildung 2.6 a), handelt es sich um eine LED mit zwei Drahtanschlüssen (Pins). Der LED-Chip ist durch eine Kunststoffkappe vor Schäden geschützt. Diese LED-Bauform kann aufgrund ihres geschlossenen Gehäuses Wärme schlecht ableiten und wird wegen ihrer meist geringen Leistungsstärke vorwiegend für einfache Signalanzeigen verwendet.



a)



b)



c)

Abb. 2.6 Beispiele für einige LED-Bauformen: T-Typ (a), SMD-LED (b), COB-LED (c). Bildquellen: Sony/Tomshardware.com (a), OSRAM Press Picture (b), www.bridgelux.com (c)

Eine SMD-LED (von **Surface Mounted Device**, deutsch: „oberflächenmontiertes Bauelement“; Abbildung 2.6 b) besitzt keine Drahtanschlüsse, sondern wird mittels lötfähiger Anschlussflächen direkt auf die Leiterplatte gelötet. Dadurch wird auch die Wärme besser abtransportiert. Ebenso wie verdrahtete LED sind SMD-LED bereits verkapselt.

Bei der COB-LED (von **Chip on Board**, deutsch: „Nacktchipmontage“) werden unverkapselte LED-Chips direkt auf eine Leiterplatte gebracht und, nachdem die Chipanschlüsse und die Leiterplatte mit einem Golddraht verbunden wurden, vergossen. Weil hier der LED-Chip direkt auf eine Leiterplatte aufgebracht wird, ist es möglich, die Temperatur optimal aus dem Halbleiterkristall nach außen zu leiten. COB-LED werden z. B. für dicht gepackte LED-Module (Einheiten, in die LED montiert sind), wie in Abbildung 2.6 c, eingesetzt.

Eine LED oder ein LED-Modul kann nicht ohne das Zwischenschalten weiterer elektronischer Bauteile, z. B. eines Vorschaltgerätes, das zur Strombegrenzung dient, direkt an die Hauptversorgungsleitungen angeschlossen werden. Bei LED-Modulen mit eingebautem Vorschaltgerät ist dies jedoch möglich. Eine LED-Lampe (Abbildung 2.7) wird definiert als eine Halbleiterlichtquelle mit einem standardisierten Sockel, bestehend aus einer LED-Lichtquelle mit optischen Systemen, elektronischen Bauteilen und einem Kühlkörper.



Abb. 2.7 Verschiedene LED-Lampen (Bildquelle: www.osram.com)

2.4 LED-Anwendungen

LED ersetzen mehr und mehr die konventionellen Lichtquellen und erlauben bereits heute ein breites Spektrum von Anwendungen. Sie werden bei Anzeigen von Messwerten und Betriebszuständen, als Hintergrundbeleuchtung in Mobiltelefonen, in Taschenlampen oder in Bühnenscheinwerfern eingesetzt. In Galerien und Museen bieten kaltweiße LED den Vorteil, die Objekte durch Wärmestrahlung nicht zu schädigen. Mit LED sind handliche Mikroprojektoren möglich, die in die Hemdtasche passen und mit denen sich digitale Fotos und Videos auf eine beliebige weiße Fläche projizieren lassen [54]. LED kommen immer häufiger in der Architektur- und Straßenbeleuchtung zum Einsatz. In Verkehrsampeln mit konventionellen Lampen wird der größte Teil der optischen Leistung der Lampe herausgefiltert, um nur rotes Licht passieren zu lassen. Rote LED emittieren dagegen nur rotes Licht und können daher dieselbe Lichtleistung bei nur 10 % der elektrischen Leistung erbringen [29].

Für die Automobilbeleuchtung gewinnen LED immer mehr an Bedeutung. Sie werden sowohl für die Innenbeleuchtung im Auto als auch für die Front- und Heckbeleuchtung verwendet. Kurze Ansprechzeiten der LED ermöglichen bei Bremsleuchten eine unmittelbare und verstärkte Wahrnehmung durch andere Verkehrsteilnehmer. Während eine konventionelle Lampe etwa 200 ms benötigt, um nach Anlegen der Spannung Licht zu emittieren, leuchtet eine LED schon nach etwa 2 ms und signalisiert damit dem nachfolgenden Verkehrsteilnehmer den Bremsvorgang.

Seit Weißlicht-LED hergestellt werden und ihre Effizienz stark gestiegen ist, versprechen LED in der Raumbeleuchtung, sowohl in Büros und Geschäften als auch in privaten Haushalten, große ökologische Vorteile. Heutzutage entfallen etwa 20 % des weltweiten Elektroenergieverbrauchs auf die Beleuchtung [6, 33], und 70 % dieser Energie verbrauchen energieineffiziente Lampen. Aus diesem Grund hat die Europäische Kommission im Jahr 2009 die Verordnung Nr. 244/2009 zur Abschaffung von herkömmlichen Glühlampen [66] erlassen. Die Glühlampen sollten schrittweise bis September 2012 durch energieeffiziente Beleuchtungsquellen ersetzt werden. LED stellen dabei eine vielversprechende Alternative dar. Wie oben erwähnt, liegt die Lichtausbeute bei kaltweißen LED-Chips derzeit bei 100 lm/W. Um abzuschätzen, welche Energieeinsparungen durch LED-Lampen möglich sind, ist allerdings das gesamte Leuchtmittel zu betrachten und nicht ausschließlich die LED-Komponente. Das elektronische Betriebsgerät (Vorschaltgerät), das Gehäuse und die Optik, die zu einer LED-Lampe gehören, sind ebenfalls mit Verlusten behaftet. So erreichen die besten derzeit verfügbaren LED-Lampen eine Lichtausbeute von 50 lm/W [4, 70]. Die Lichtausbeute liegt damit über der von Glüh- und Halogenlampen mit etwa 13 lm/W bzw. 17 lm/W, jedoch teilweise unterhalb der von Leuchtstofflampen, die etwa 50 lm/W bis 70 lm/W erreichen.

Mit steigenden Lichtausbeuten bieten LED-Lampen auch weitere Vorteile. Sie zeichnen sich, ein gutes Thermomanagement vorausgesetzt, durch eine lange Lebensdauer von bis zu 50 000 Stunden aus, bieten eine gute Farbwiedergabe und sind stoß- und vibrationsunempfindlich. LED-Lampen sind im Gegensatz zu Kompaktleuchtstofflampen frei von Quecksilber und lassen sich ohne Verzögerung an- und ausschalten.

Eine Studie von OSRAM Opto Semiconductors zur Ökobilanz von LED-Lampen [41], in der analysiert wurde, wie viel Energie und Rohstoffe die LED-Lampe bei der Herstellung, während des Transports und der Nutzung und schließlich bei der Entsorgung verbraucht und welche Umweltbelastungen hierbei auftreten, zeigt, dass schon heutige LED-Lampen die Ökobilanz-Werte der Kompaktleuchtstofflampen erreichen und herkömmlichen Glühlampen ohnehin weit überlegen sind. Da die Effizienz der LED weiter steigt, werden in Zukunft noch bessere Ökobilanz-Ergebnisse der LED-Lampen möglich sein. Durch Kombination der LED-Leuchtmittel mit Lichtmanagementsystemen, bei denen Sensoren die Tageslichtsituation und die Anwesenheit von Personen im Raum erfassen, könnte der Energieverbrauch für die Beleuchtung zusätzlich sinken. Besonders hohes Einsparpotenzial gibt es in Bürogebäuden, wo etwa ein Viertel der Energie für Beleuchtung benötigt wird.

LED bieten auch in Bereichen der Innenausstattung und des Designs große Potenziale. Ihre kleinen Abmessungen eröffnen viel Freiheit beim Design von Leuchtmitteln, und ihre gerichtete Abstrahlung erlaubt es, das Licht genau dorthin zu bringen, wo es gebraucht wird. Da LED in allen Farben erhältlich sind, lassen sich durch entsprechende elektronische Ansteuerung farblich veränderbare Lichtquellen realisieren. So wird eine dynamische Beleuchtung möglich, bei der sich die spektralen Anteile des Lichtes und die Lichtintensität auf die Tageszeit oder individuelle Bedürfnisse einstellen lassen [62]. Solche modernen Beleuchtungskonzepte mit LED, die helfen können, einen gesunden Tag-und-Nacht-Rhythmus (siehe Kapitel 3) zu unterstützen, wurden bereits in einigen Kliniken, Pflege- und Altenheimen eingesetzt.

Es existieren jedoch auch spezielle Anwendungsbereiche für LED [29]. LED findet man in OP-Leuchten und Arbeitsleuchten zur Reparatur und Inspektion. In der Qualitätsprüfung ermöglichen es LED-Hochgeschwindigkeitsblitze mit Belichtungszeiten von nur 300 ns, schnelle Fertigungsabläufe direkt zu überwachen. Des Weiteren kommen UV-LED in der Zahntechnik zum Polymerisieren von Kunststoffen, bei der Banknoten-Überprüfung oder in der Entkeimung zum Einsatz. IR-LED werden in der Freiraum-Informationenübertragung wie in Infrarotfernbedienungen eingesetzt (z. B. für Fernseher oder Radio) oder bei der Infrarotschnittstelle IrDA in Mobiltelefonen und mobilen Computern. Ein anderer Anwendungsbereich ist die Alarm- und Sicherheitstechnik, wo IR-LED in Lichtschranken oder Bewegungsmeldern eingesetzt werden.

Diese Beispiele zeigen, dass LED inzwischen in sehr vielen Bereichen eingesetzt werden und zu einer bedeutenden Quelle künstlicher optischer Strahlung geworden sind.

3 Wirkung optischer Strahlung auf den Menschen

Optische Strahlung dringt in menschliches Gewebe nur oberflächlich ein, die inneren Organe werden nicht erreicht. Deswegen ist die Wirkung auf die Augen und die Haut begrenzt [57].

Die wichtigste Wirkung der optischen Strahlung im sichtbaren Spektralbereich ist das Sehen. Das ins Auge treffende Licht gelangt durch Hornhaut, Linse und Glaskörper auf die Netzhaut und wird dort von als Photorezeptoren spezialisierten Sinneszellen - den Zapfen und den Stäbchen - wahrgenommen. Die dadurch erzeugten Signale werden über den Sehnerv an das Gehirn weitergeleitet und dort als Sinneseindruck verarbeitet.

Die etwa 6 Millionen Zapfen sind die Photorezeptoren, die nur bei ausreichender Helligkeit aktiv sind. Sie dienen dem Tagessehen (photopisches Sehen) wobei die Farben wahrgenommen werden. Der Mensch verfügt über drei verschiedene Zapfentypen, S-, M- und L-Zapfen, die sich in ihren Absorptionsmaxima und somit in ihrer Empfindlichkeit gegenüber bestimmten Wellenlängen des Lichtes unterscheiden. Das Absorptionsmaximum des S-Zapfens (von *short wavelength receptor*) liegt bei einer Wellenlänge von 420 nm, daher heißt er auch Blaurezeptor. Der M-Zapfen (von *medium wavelength receptor*) hat sein Absorptionsmaximum bei 534 nm und heißt deswegen auch Grünrezeptor. Das Absorptionsmaximum des L-Zapfens (von *long wavelength receptor*) liegt bei 563 nm. Obwohl hier das Absorptionsmaximum im gelbgrünen Spektralbereich liegt, wird der L-Zapfen auch als Rotrezeptor bezeichnet, da er die Hauptleistung in der Wahrnehmung des roten Spektralbereichs übernimmt. Abbildung 3.1 zeigt die spektralen Absorptionskurven, die die Reizantwort der drei Zapfentypen in Abhängigkeit von der Wellenlänge des einwirkenden Lichts beschreiben. Die Summe dieser drei Absorptionskurven beschreibt die spektrale Hellempfindlichkeitskurve für das Tagessehen, die $V(\lambda)$ -Kurve. Diese Kurve hat ihr Maximum im grünem Spektralbereich, bei 555 nm (Abbildung 3.2).

Farbtöne ergeben sich durch die überwiegende Aktivierung bestimmter Zapfentypen, die Eindrücke Grau bis Weiß dagegen durch eine ausgeglichene Reizung aller Zapfentypen. Blendung tritt ein, wenn bei übermäßiger Helligkeit die Zapfen überreizt werden. Wenn bei abnehmender Helligkeit, z. B. in der Abenddämmerung, die Zapfen nicht mehr ausreichend stark belichtet werden, scheinen die Farbtöne zu verschwinden.

Die Stäbchen sind zahlreicher (120 Millionen) und lichtempfindlicher als die Zapfen. Sie ermöglichen das Nachtsehen (skotopisches Sehen) bei geringer Helligkeit. Da beim Menschen nur ein Typ von Stäbchen vorhanden ist, kann er zwar die Helligkeits-, nicht aber die Farbunterschiede registrieren. Das Absorptionsmaximum der Stäbchen liegt bei 498 nm (Abbildung 3.1).

Neben den Zapfen und Stäbchen wurde erst vor kurzer Zeit ein dritter Rezeptor in der Netzhaut des Auges nachgewiesen [5, 8, 44]. Anders als Zapfen und Stäbchen dienen die sogenannten intrinsisch photosensitiven retinalen Ganglienzellen (ipRGC von *intrinsically photosensitive retinal ganglion cells*) nicht dem Sehen.

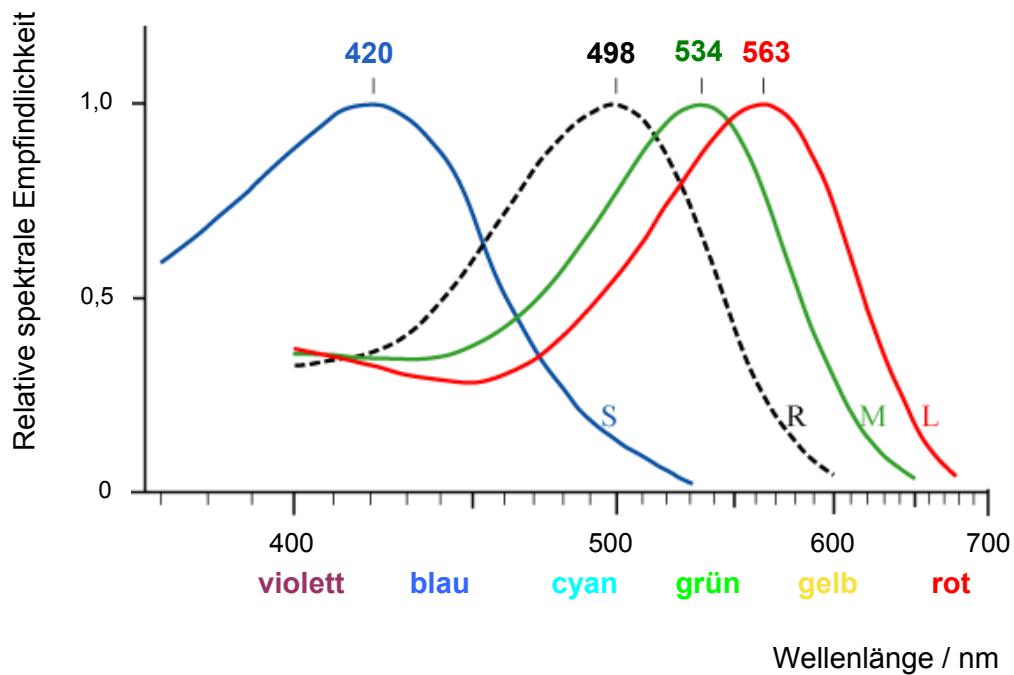


Abb. 3.1 Empfindlichkeitsverteilung der drei Zapfentypen (S-, M- und L-Zapfen) sowie der Stäbchen (R steht für das englische Wort *rods*); nach [7]

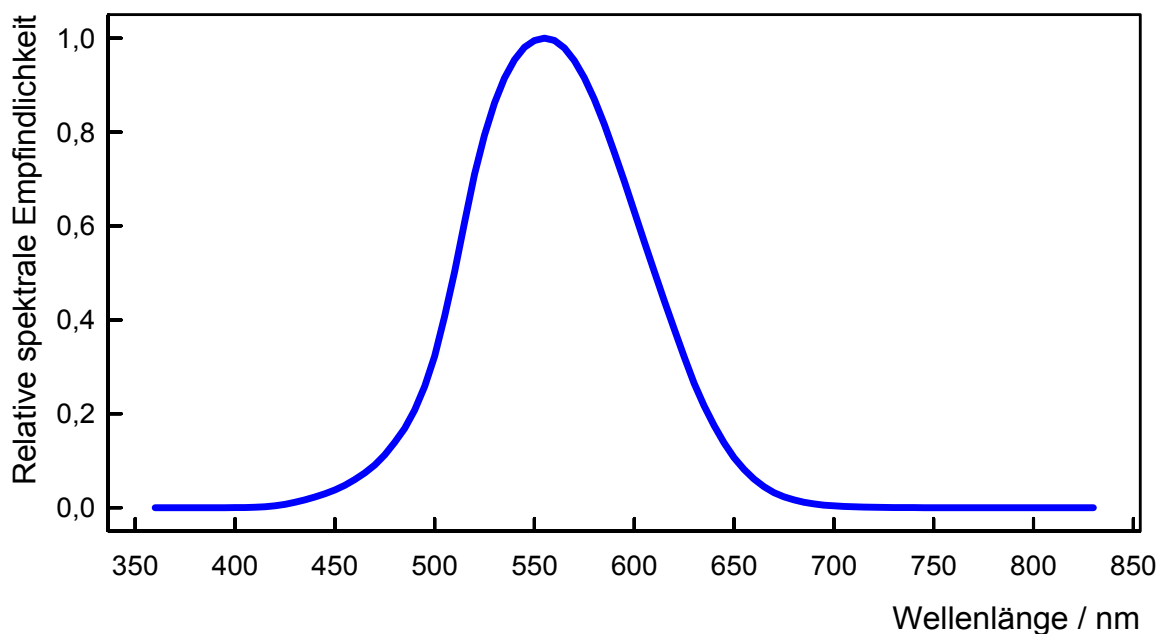


Abb. 3.2 Hellempfindlichkeitskurve für das Tagessehen ($V(\lambda)$ -Kurve). Im Bereich des Tagessehens setzt sich der Hellempfindlichkeitsgrad des Auges aus der Empfindlichkeit der drei Zapfentypen in der Netzhaut zusammen. Die Hellempfindlichkeitskurve hat ein Maximum bei 555 nm.

Mit Melanopsin als Rezeptorprotein vermitteln sie die Information über Helligkeit oder Dunkelheit dem *Nucleus suprachiasmaticus* (SCN), der die Freisetzung des Hormons Melatonin aus der Zirbeldrüse und damit den Tag-und-Nacht-Rhythmus (zirkadianen Rhythmus) steuert. Synthese von Melatonin setzt mit der Abenddämmerung ein und trägt zur Schlafeinleitung bei, morgendliches Tageslicht unterdrückt seine Produktion. Künstliches Licht in der Abendzeit und nachts kann dem Körper signalisieren, dass noch Tag ist, die Melatonin-Produktion unterdrücken und damit den Tag-und-Nacht-Rhythmus beeinflussen. Dadurch wird jedoch nicht nur der Schlaf- und Wachzyklus beeinflusst, sondern auch viele andere wichtige physiologische Prozesse wie Metabolismus, Hormonsekretion, Immunabwehr oder der Abbau von Gefahrstoffen.

Das Melanopsin ist überwiegend im blauen Bereich des Spektrums empfindlich: Das Maximum der Melatonin-Suppression und damit der zirkadianen Beeinflussung liegt bei einer Wellenlänge von etwa 460 nm, was blauem Licht entspricht (Abbildung 3.3). Wegen ihrer Beeinflussung des Tag-und-Nacht-Rhythmus sind Blaulichtanteile in den Abendstunden normalerweise nicht wünschenswert.

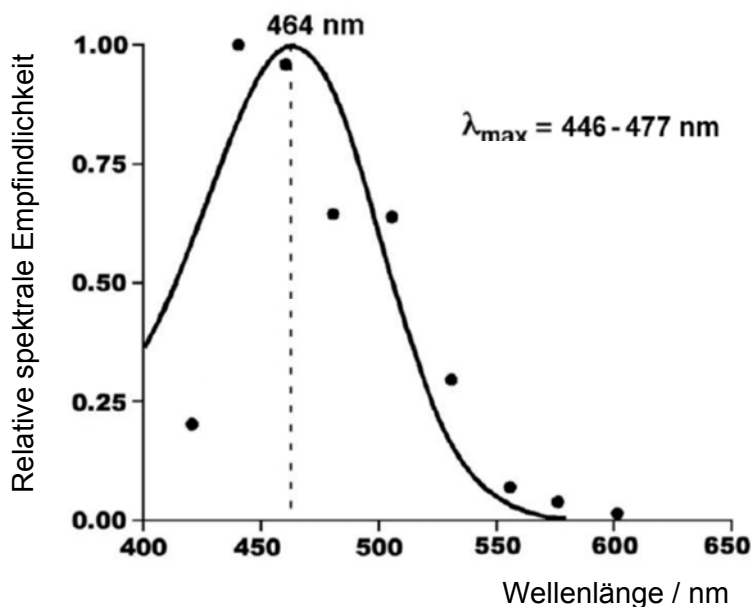


Abb. 3.3 Spektrale Empfindlichkeit für die Melatonin-Suppression (aus [8])

In Bezug auf die menschliche Haut ist die wichtigste positive Wirkung optischer Strahlung die Bildung von Vitamin D. Sie erfolgt unter Einfluss von UV-B-Strahlung mit einer Wellenlänge zwischen 280 nm und 315 nm.

3.1 Schädigende Wirkungen optischer Strahlung

Die Wirkung optischer Strahlung ist auf die Augen und die Haut begrenzt und die Eindringtiefe ist von der Wellenlänge abhängig. Während kurzwellige UV-Strahlung und langwellige IR-Strahlung bereits an der Oberfläche absorbiert werden, dringt Strahlung im sichtbaren und nahen IR-Spektralbereich tiefer ein (Abbildungen 3.4 und 3.5). Art und Schwere einer durch optische Strahlung hervorgerufenen Schädigung ist neben der Wellenlänge auch abhängig von der Intensität, der Bestrahlungsdauer sowie der bestrahlten Fläche und den optischen Eigenschaften des Gewebes, hier vor allem seinem Absorptionsvermögen.

Die Abhängigkeit der Absorption von der Wellenlänge hängt mit den unterschiedlichen optischen Eigenschaften der Gewebestandteile zusammen. Biologisches Gewebe enthält in der Regel sehr viel Wasser (70 % - 80 %), das die optische Strahlung am stärksten im fernen IR-Bereich (IR-B und IR-C) absorbiert. Im UV-, sichtbaren und nahen IR-Bereich (IR-A) wird die Absorption dagegen durch die biologischen Moleküle Melanin (das Farbpigment, das in der Netzhaut des Auges und der Haut vorkommt) bzw. Hämoglobin (der rote Blutfarbstoff, der die Atmung und die Stoffwechselfvorgänge regelt) ermöglicht.

Die Wirkung optischer Strahlung kann durch thermische und photochemische Effekte beschrieben werden [57]. Thermische Effekte dominieren im langwelligen Teil des sichtbaren Spektrums und im IR-Spektralbereich: Die im Gewebe enthaltenen Moleküle führen verstärkt Schwingungen aus, was zur Erhitzung des Gewebes führt. Die entstehende Wärme wird auf das umliegende Gewebe übertragen. Aufgrund einer lokalen Temperaturüberhöhung kann ein Schaden entstehen.

Bei den photochemischen Effekten wird die Energie der einfallenden optischen Strahlung nicht in Wärme, sondern in chemische Reaktionsenergie umgesetzt. Diese Effekte dominieren bei ausreichender Photonenenergie, d. h. vor allem für optische Strahlung im UV- und kurzwelligen sichtbaren Spektralbereich. Bestimmte biologische Moleküle absorbieren dabei die auftreffende optische Strahlung, werden dadurch angeregt und geben ihre Energie an Sauerstoff-Moleküle ab. Dadurch entsteht eine hochreaktive Form des Sauerstoffs (Singulett-Sauerstoff). Dieser greift das umliegende Gewebe an und erzeugt freie Radikale, die ebenfalls hochreaktiv sind und umgebende zelluläre Moleküle wie Proteine oder die Erbsubstanz Desoxyribonukleinsäure (DNS) schädigen können. Optische Strahlung im kurzwelligen UV-Spektralbereich hat sogar ausreichende Photonenenergie um eine direkte Schädigung der DNS hervorzurufen, indem chemische Bindungen gespalten und dadurch Bausteine der DNS anders verknüpft werden. Derartige Schädigungen der DNS können krebsauslösend wirken.

Eine Reihe chemischer Verbindungen und Medikamente kann das biologische Gewebe für die photochemische Wirkung von optischer Strahlung sensibilisieren. Dadurch können heftige biologische Reaktionen, so genannte „phototoxische“ Reaktionen, auftreten.

Es besteht ein prinzipieller Unterschied zwischen thermischen und photochemischen Wirkungen: Bleibt bei der thermischen Wirkung die Temperatur des Gewebes auch bei länger dauernder Absorption von Photonen unterhalb eines Schwellwertes, so ist

keine Schädigung zu befürchten. Andererseits kann bei der photochemischen Wirkung die Absorption bereits eines Photons zu Schädigungen auf molekularer Ebene führen. Diese Veränderungen sind kumulativ.

In Bezug auf die nicht-visuelle Wirkung des Lichtes ist zu erwähnen, dass die Störung des Tag-und-Nacht-Rhythmus durch externe Einflüsse wie künstliches Licht am Arbeitsplatz in der Abendzeit oder Nachtschichtarbeit für die Entstehung von Gesundheitsstörungen verantwortlich gemacht wird. Viele Lichtplaner schlagen neue Herangehensweisen bei der Planung von Beleuchtungssystemen für Arbeitsplätze vor, die sowohl die visuelle als auch die zirkadiane (melanopische) Wirkung berücksichtigen: Man spricht von einer dynamischen Beleuchtung hinsichtlich einer spektralen, räumlichen und zeitlichen Dimension. Weil das Spektrum der Weißlicht emittierenden LED bei 460 nm ein Maximum aufweist, wo auch das Maximum der Melatonin-Suppression liegt (vergleiche die Abbildungen 2.5 und 3.3), können diese LED den Tag-und-Nacht-Rhythmus beeinflussen [30]. Das hier beschriebene Projekt hat sich mit melanopischen Wirkungen der LED nicht befasst.

3.1.1 Gefährdungen der Augen

Das am meisten gefährdete Organ beim Umgang mit optischer Strahlung ist das Auge (Abbildung 3.4). Die Hornhaut (*Cornea*), die selbst etwa 75 % Wasser enthält, ist nach außen nur durch eine wenige Mikrometer dicke Schicht gegen die Tränenflüssigkeit geschützt. An die Hornhaut schließt sich die vordere Augenkammer an, die mit Kammerwasser gefüllt ist. Vor der Augenlinse befindet sich kreisförmig die Regenbogenhaut (*Iris*). Die Öffnung der Regenbogenhaut wird Pupille genannt. Der Pupillendurchmesser ändert sich je nach Helligkeit, und bestimmt damit, wie viel sichtbare optische Strahlung ins Auge eintreten kann. Der Pupillendurchmesser kann dabei von 2 mm bis 7 mm variieren. Der Raum hinter der Iris bis zur Linse wird hintere Augenkammer genannt.

Die Linse ist mit einer elastischen Kapsel und einem weichen Kern in der Lage, ihre Form und damit die Brechkraft zu ändern (Akkommodation). Zwischen der Linse und der Netzhaut (Retina) befindet sich der Glaskörper, der zu etwa 98 % aus Wasser sowie einem Netz von Kollagenfasern besteht und eine gelartige Struktur hat.

In der Netzhaut, wo die Photorezeptoren liegen, werden die Lichtreize zu Signalen verarbeitet, die durch den Sehnerv an das Gehirn weitergeleitet werden. An der Einmündung des Sehnervs und der Blutgefäße in die Netzhaut (*Papilla nervi optici*) befinden sich weder Zapfen noch Stäbchen, so dass ein Sehen dort nicht möglich ist. Sie heißt deshalb Blinder Fleck. Der Blinde Fleck hat einen Durchmesser von durchschnittlich 1,5 mm und ist individuell unterschiedlich meist rund oder oval geformt.

Als Gelber Fleck (*Macula lutea*) wird der Bereich der Netzhaut mit der größten Dichte von Photorezeptoren bezeichnet. Er befindet sich in der Mitte der Netzhaut und hat einen Durchmesser von etwa 5 mm. Die Photorezeptoren des Gelben Flecks sind hauptsächlich die für die Farbwahrnehmung verantwortlichen Zapfen. Die Netzhautgrube (*Fovea centralis*) ist der zentrale Teil des Gelben Flecks mit einem Durchmesser von 1,5 mm. Sie ist die Stelle des schärfsten Sehens. Sie enthält M-Zapfen für den grünen Spektralbereich des sichtbaren Lichts und L-Zapfen für den roten Spektralbereich, jedoch keine S-Zapfen für den blauen Spektralbereich. Hinter der Photo-

rezeptorenschicht folgen das Pigmentepithel und die Aderhaut, die die Netzhaut mit Blut versorgt und auf der Lederhaut aufliegt. Die optische Strahlungsenergie wird überwiegend durch Melanin in einer sehr dünnen Schicht des Pigmentepithels absorbiert [36].

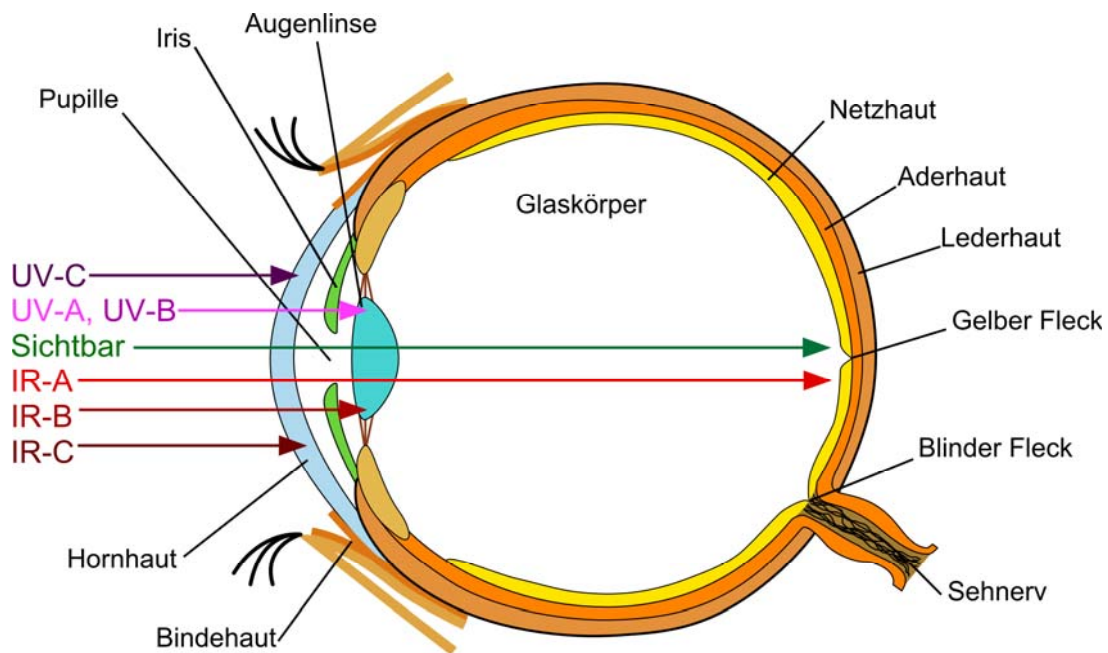


Abb. 3.4 Eindringtiefen optischer Strahlung in das Auge

Das Sehvermögen ist auf den sichtbaren Spektralbereich begrenzt, d. h. diese Strahlung gelangt durch die Hornhaut, die Augenlinse und den Glaskörper, wird auf der Netzhaut abgebildet und kann unter Umständen eine Netzhautschädigung hervorrufen. Schäden an der Netzhaut sind besonders schwerwiegend und können zu erheblichen Beeinträchtigungen des Sehvermögens führen. Kleinere Schädigungen der Netzhaut bleiben meist unbemerkt, soweit sie außerhalb des Flecks des schärfsten Sehens liegen. Größere geschädigte Stellen können jedoch zu Ausfällen im Gesichtsfeld führen. Bei einer Schädigung an der Stelle des schärfsten Sehens kann das Scharfsehen und das Farbsehvermögen stark verringert werden. Wird gar der Blinde Fleck getroffen, droht die völlige Erblindung. Im Hinblick auf eine potenzielle Netzhautschädigung muss besonders berücksichtigt werden, dass darüber hinaus auch optische Strahlung im IR-A-Spektralbereich bis 1 400 nm von der Augenlinse auf die Netzhaut fokussiert wird. Obwohl sie nicht wahrgenommen werden kann, weil die Netzhaut für diese Wellenlängen keine Rezeptoren besitzt, kann sie dort Schädigungen hervorrufen. Eine Netzhautschädigung ist irreversibel.

Eine thermische Netzhautschädigung entsteht immer dann, wenn in dem retinalen Pigmentepithel durch die absorbierte optische Strahlung eine Temperaturerhöhung von 10°C - 20°C erreicht wird [18]. Dieser Mechanismus der Netzhautschädigung ist bei kurzer Bestrahlungsdauer (weniger als 10 s) dominant, und die Netzhautschädigung ist normalerweise sofort bemerkbar [21, 27, 73]. Thermische Netzhautschädigungen werden hauptsächlich durch Laserstrahlung verursacht.

Eine photochemische Netzhautschädigung (Photoretinitis) entsteht bei längerer Bestrahlungsdauer, über 10 s [20, 21]. Eine bemerkbare Schädigung verzögert sich hier um mehr als zwölf Stunden und äußert sich in einer Entpigmentierung. Eine photochemische Netzhautschädigung kann entstehen wenn man für längere Zeit in die Sonne sieht, wie z. B. bei der Beobachtung einer Sonnenfinsternis.

Im UV- und im IR-Spektralbereich wird die optische Strahlung zunehmend durch Wasser in den vorderen Augenmedien absorbiert und kann somit die Netzhaut nicht schädigen, weil sich die Stelle der Einwirkung ändert. Da die UV-Strahlung und die Strahlung im fernen IR-Bereich von der Hornhaut, der Bindehaut und der Linse absorbiert werden, sind diese Teile des Auges gefährdet. Durch UV-Strahlung können photochemische Reaktionen ausgelöst werden, die zu sehr schmerzhaften Entzündungen der Hornhaut (Photokeratitis) und/oder der Bindehaut (Photokonjunktivitis) führen. Dabei werden die äußeren Zellen der Hornhaut und der Bindehaut zerstört. Die Schädigung macht sich vier bis zwölf Stunden nach der Exposition durch starke Augenschmerzen bemerkbar. Weil in der Horn- und Bindehaut immer neue Epithelzellen nachgebildet werden, ist diese Schädigung reversibel. Die Heilung tritt normalerweise innerhalb weniger Tage ein [43]. Zu dieser Schädigung kommt es z. B. beim Elektroschweißen, wenn kein Augenschutz getragen wird.

Wiederholte Einwirkung der UV-Strahlung mit Intensitäten, die unterhalb derjenigen liegen, die zu einer akuten Horn- bzw. Bindehautentzündung führen, kann langfristig eine Linsentrübung (Katarakt) verursachen [58, 72]. Durch photochemische Reaktionen werden in den Linsenzellen bestimmte Proteine (Kristalline) verändert, was zu einer Pigmentierung der Zellen führt. Da in der Augenlinse keine neuen Zellen nachgebildet werden, ist diese Schädigung irreversibel. Hier handelt es sich um einen Prozess, dessen Wirkung über einen längeren Zeitraum, meist Jahrzehnte, kumuliert.

Auch eine langjährige Einwirkung von IR-Strahlung kann zu einer Linsentrübung führen, die sich durch eine Kondensation der Linsenproteine zu Aggregaten ausbildet [34, 55]. Als Linsentemperatur, bei der es zu einem thermischen Katarakt kommen kann, werden Werte zwischen 40°C und 45°C angegeben [40]. Auch diese Schädigung ist irreversibel und kann zur vollständigen Erblindung führen. Allerdings kann eine getrübte Augenlinse heute operativ durch eine künstliche Linse ersetzt werden. Ein Beispiel für Tätigkeiten, bei denen nach langjähriger Einwirkung von IR-Strahlung eine Linsentrübung auftreten kann, ist die Arbeit von Glasbläsern an Glasschmelzöfen. Im IR-Spektralbereich oberhalb einer Wellenlänge von etwa 2 500 nm ist nur noch die Hornhaut betroffen.

Schließlich ist unter den möglichen schädlichen Wirkungen optischer Strahlung die Blendung zu nennen [18, 47]. Sie ist zwar nicht mit einer direkten Schädigung des Auges verbunden, kann aber das Sehen beeinträchtigen und damit zu Unfällen bei sicherheitsrelevanten Tätigkeiten, etwa im Straßenverkehr oder an Maschinen, führen.

Mögliche Schädigungen bei der Einwirkung von optischer Strahlung auf das Auge sind in Tabelle 3.1 zusammengefasst.

3.1.2 Gefährdungen der Haut

Die Haut ist durch Melanin pigmentiert und ein wesentlicher Bestandteil des Hautgewebes ist Wasser. Die Eindringtiefe der optischen Strahlung hängt auch bei der Haut von der Wellenlänge ab. Dementsprechend sind die Hautschichten unterschiedlich stark betroffen (Abbildung 3.5). Ein Großteil der optischen Strahlung im UV-Spektralbereich wird von der Oberhaut absorbiert, wobei die Strahlung im langwelligen UV-A-Spektralbereich deutlich tiefer eindringt. Langwellige IR-Strahlung wird ebenfalls bereits in der Oberhaut absorbiert.

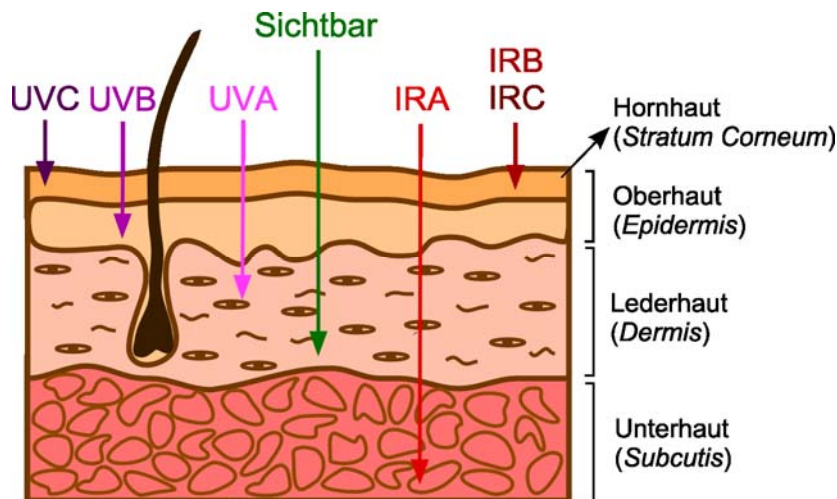


Abb. 3.5 Eindringtiefen optischer Strahlung in die Haut

Eine chronische UV-Exposition kann zu einer vorzeitigen Hautalterung führen, die durch eine faltige Lederhaut charakterisiert ist. Hierfür ist vor allem Strahlung im UV-A-Spektralbereich verantwortlich. Eine Exposition im UV-A-Spektralbereich kann außerdem eine sofortige, jedoch vorübergehende Veränderung der Hautpigmentierung (Sofortpigmentierung) auslösen. Die hauptsächliche Wirkung der optischen Strahlung im UV-B-Spektralbereich ist die Erythembildung (Hautrötung, Sonnenbrand) [32]. Mit dem Abklingen der Hautrötung entsteht infolge des Erythems eine verzögerte Pigmentierung der Haut. UV-C-Strahlung wird von allen biologischen Geweben so stark absorbiert, dass die Strahlung nur noch in eine dünne Oberschicht eindringen kann. Durch UV-B-Strahlung können ebenfalls Mutationen des Tumorsuppressor-Gens p53 entstehen, die Hautkrebs (Hautkarzinom) zur Folge haben können [26]. Hautkarzinome sind die schwerwiegendste Langzeitfolge starker UV-Expositionen.

Intensive Strahlung im sichtbaren Spektralbereich kann zur Hauterwärmung führen und photosensitive Reaktionen hervorrufen. Bei Einwirkung intensiver IR-Strahlung auf die Haut kann es zur Verbrennung kommen. Bei lang andauernder Hautbestrahlung spielen sowohl Fragen der Wärmeleitung als auch der Wärmeabfuhr durch das Blut eine Rolle. Aufgrund der Durchblutung des Gewebes und der damit verbundenen Wärmeabfuhr wird die Temperaturerhöhung begrenzt.

Mögliche Auswirkungen und Schädigungen bei der Einwirkung optischer Strahlung auf die Haut sind in Tabelle 3.1 zusammengefasst.

Tab. 3.1 Mögliche Auswirkungen und Schädigungen bei der Einwirkung optischer Strahlung auf das Auge und die Haut

Spektralbereich	Auge	Haut
UV-C	Photokeratitis Photokonjunktivitis	Erythem Hautkarzinom
UV-B	Photokeratitis Photokonjunktivitis Katarakt	Erythem Verstärkte Pigmentierung (Spätpigmentierung) Beschleunigte Prozesse der Hautalterung Hautkarzinom
UV-A	Katarakt	Bräunung (Sofortpigmentierung) Beschleunigte Prozesse der Hautalterung Hautkarzinom
Sichtbar	Photoretinitis (photochemische Netzhautschädigung) Photothermische Netzhautschädigung	Photosensitive Reaktionen
IR-A	Photothermische Netzhautschädigung Katarakt	Photosensitive Reaktionen Verbrennung der Haut
IR-B	Katarakt Verbrennung der Hornhaut	Verbrennung der Haut
IR-C	Verbrennung der Hornhaut	Verbrennung der Haut

4 Relevante messtechnische Größen für die Gefährdungsbeurteilung inkohärenter optischer Strahlung

Für das Verständnis der nachfolgenden Kapitel zur Beurteilung der photobiologischen Sicherheit von LED ist die Kenntnis einiger geometrischer Größen sowie Definitionen und Beziehungen aus der Radiometrie und Photometrie erforderlich [57].

4.1 Geometrische Größen

4.1.1 Winkelausdehnung der Quelle α

Der räumliche radialsymmetrische Winkel, unter dem eine optische Strahlungsquelle von einem Raumpunkt erscheint, wird durch den ebenen Winkel α , die Winkelausdehnung der Quelle, beschrieben (Abbildung 4.1).

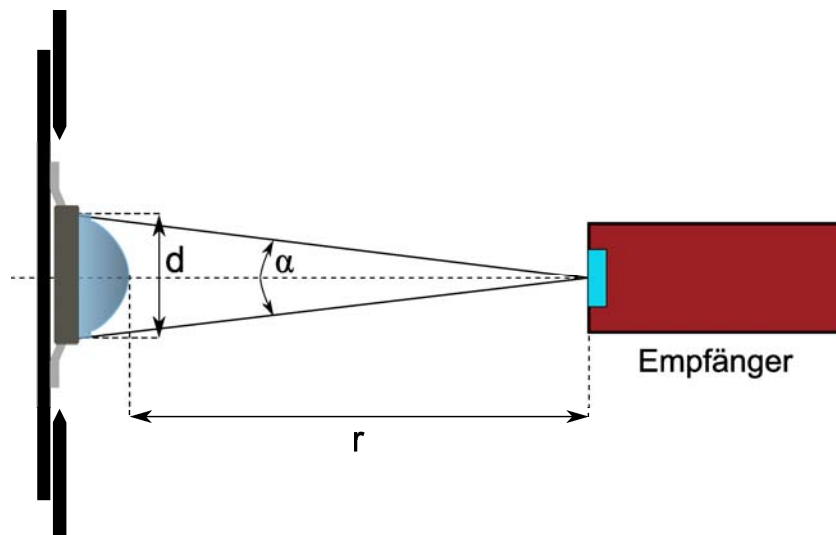


Abb. 4.1 Zur Definition der Winkelausdehnung α einer optischen Strahlungsquelle

Die Winkelausdehnung α der optischen Strahlungsquelle ergibt sich aus der Größe der Quelle d und dem Messabstand r . Für kleine Winkel gilt:

$$\alpha = \frac{d}{r} \quad (4.1)$$

Die Einheit der Winkelausdehnung α ist Radiant (rad).

Bei LED ist die Strahlungsquelle (der Chip) meistens in einen Kunststoffkörper integriert, dessen gekrümmte Oberfläche als optische Linse wirkt. Durch die Linse entsteht bei direktem Blick für das Auge eine sogenannte „scheinbare“ Quelle, deren

Größe d' nicht mit der geometrischen Größe der Quelle d übereinstimmt (Abbildung 4.2), was wiederum auch eine Änderung der Winkelausdehnung α zur Folge hat.

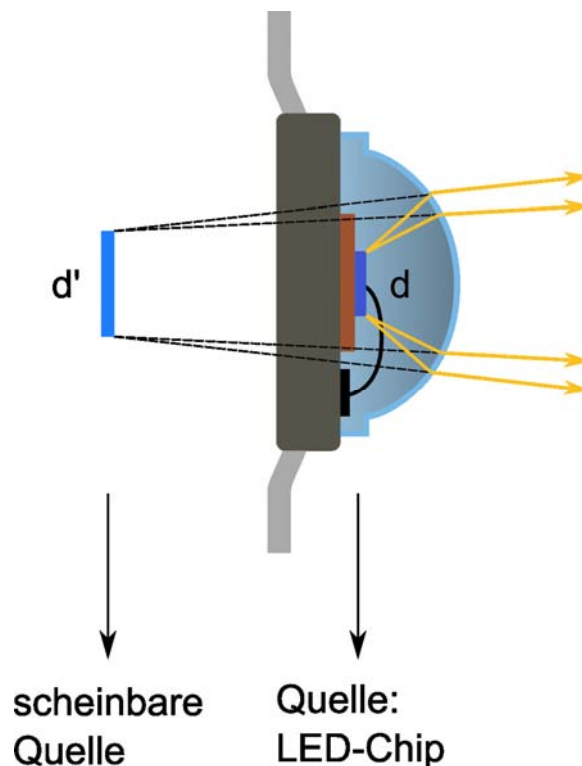


Abb. 4.2 Scheinbare Quelle

4.1.2 Empfangswinkel γ

Das räumliche radialsymmetrische Sichtfeld (Gesichtsfeld oder *field of view* - FOV), innerhalb dessen ein Empfänger auf optische Strahlung reagiert, wird durch den ebenen Empfangswinkel γ beschrieben. Dieser Empfangswinkel kann durch Blenden in der Nähe der Quelle (Abbildung 4.3) oder durch optische Elemente vor dem Empfänger festgelegt werden (siehe Kapitel 6). Die Einheit des ebenen Empfangswinkels γ ist Radiant (rad).

Der Empfangswinkel γ darf nicht mit der Winkelausdehnung der scheinbaren Quelle α verwechselt werden (Abbildung 4.3). Als ein Winkel, der vom Detektor gesehen wird, ist der Empfangswinkel γ eine Eigenschaft des Empfängers. Die Winkelausdehnung α ist dagegen eine Eigenschaft der Quelle. Der Empfangswinkel γ kann größer oder kleiner als die Winkelausdehnung α sein.

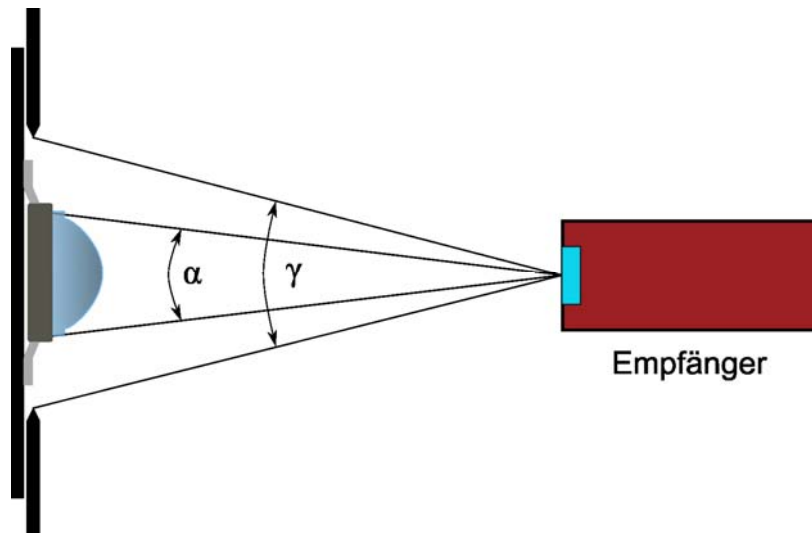


Abb. 4.3 Zur Definition des Empfangswinkels γ . Zum Vergleich wurde auch die Winkelausdehnung α eingezeichnet.

4.2 Radiometrische und photometrische Größen

Neben radiometrischen Größen, die optische Strahlung auf rein physikalischer Basis charakterisieren, werden im sichtbaren, d. h. vom menschlichen Auge wahrgenommenen Spektralbereich, auch die photometrischen Größen angewendet. Die photometrischen Größen berücksichtigen die physiologischen Eigenschaften des Auges, nämlich dessen spektrale Empfindlichkeit.

Im Folgenden werden einige radiometrische und photometrische Größen definiert.

Die Strahlungsenergie Q ist die Energie, die sich in Form einer elektromagnetischen Welle ausbreitet. Ihre Einheit ist Joule (J).

Die Strahlungsleistung (Strahlungsfluss) Φ ist die Strahlungsenergie, die sich pro Zeiteinheit in Form einer elektromagnetischen Welle ausbreitet:

$$\Phi = \frac{dQ}{dt} \quad (4.2)$$

Ihre Einheit ist Watt (W).

Die Bestrahlungsstärke E an einem Punkt einer Oberfläche ist der Quotient der Strahlungsleistung $d\Phi$, die auf ein den Punkt enthaltendes Element der Oberfläche auftrifft, und der Fläche dA dieses Elementes:

$$E = \frac{d\Phi}{dA} \quad (4.3)$$

Die Einheit der Bestrahlungsstärke ist $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$. Die Bestrahlungsstärke E ist eine Empfängergröße.

Die Bestrahlung H ist das zeitliche Integral der Bestrahlungsstärke über einen Zeitraum t :

$$H = \int_0^t E(t) \cdot dt \quad (4.4)$$

Ist die Bestrahlungsstärke während des betrachteten Zeitraums t konstant, gilt:

$$H = E \cdot t \quad (4.5)$$

Die Einheit der Bestrahlung ist $\text{J}\cdot\text{m}^{-2}$.

Die Strahldichte L ist definiert als:

$$L = \frac{d^2\Phi}{dA \cdot \cos \varepsilon \cdot d\Omega} \quad (4.6)$$

Dabei ist $d\Phi$ die Strahlungsleistung, die in einem elementaren Bündel durch den gegebenen Punkt geht und sich in den Raumwinkel $d\Omega$ (gemessen in Steradian⁴) ausbreitet; dA ist eine Querschnittsfläche dieses Bündels, das den gegebenen Punkt enthält, und $d\varepsilon$ der Winkel zwischen den Normalen der Querschnittsfläche und der Richtung des Bündels (Abbildung 4.4). Die Einheit der Strahldichte ist $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$.

Strahldichte ist eine Eigenschaft der Quelle. Sie ist die physikalische Größe, die unverändert erhalten bleibt, eine sogenannte Invariante: Strahldichte kann durch optische Geräte, wie Linsen, nicht verändert werden [16].

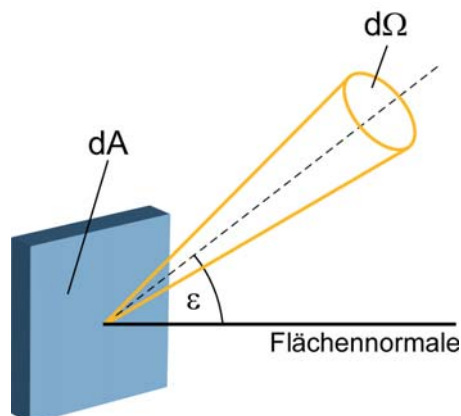


Abb. 4.4 Zur Definition der Strahldichte

⁴ Der Raumwinkel von 1 Steradian (sr) umschließt auf der Fläche einer Kugel mit 1 m Radius, eine Fläche von 1 m².

Das Zeitintegral der Strahldichte L_i ergibt sich aus der Strahldichte L als Zeitintegral über einen Zeitraum t :

$$L_i = \int_0^t L \cdot dt \quad (4.7)$$

Ist die Strahldichte während des betrachteten Zeitraums t konstant, gilt:

$$L_i = L \cdot t \quad (4.8)$$

Die Einheit ist $\text{J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$.

Für eine monochromatische Strahlung der Wellenlänge λ errechnet sich eine photometrische Größe durch die Multiplikation der entsprechenden radiometrischen Größe mit der spektralen Hellempfindlichkeitskurve des Auges $V(\lambda)$ für das Tagessehen (Abbildung 3.2) und dem Maximalwert des photometrischen Strahlungsäquivalents $K_m = 683 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}$. Beispielsweise wird der Lichtstrom, Φ_v^5 , aus der Strahlungsleistung Φ wie folgt berechnet:

$$\Phi_v = K_m \int_{380\text{nm}}^{780\text{nm}} \frac{d\Phi(\lambda)}{d\lambda} \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda \quad (4.9)$$

Im Maximum der Augenempfindlichkeit bei 555 nm entspricht der Strahlungsleistung Φ von 1 W einem Lichtstrom Φ_v von 683 lm.

Die Definitionen der photometrischen Größen sind, abgesehen von der Bewertung mit der spektralen Hellempfindlichkeitskurve des Auges und der Multiplikation mit dem photometrischen Strahlungsäquivalent, die gleichen wie die der radiometrischen Größen. So bezeichnet der Lichtstrom Φ_v die gesamte sichtbare Strahlung, die von einer Quelle ausgesandt wird. Die Einheit ist Lumen (lm). Die Beleuchtungsstärke E_v ist das Verhältnis von auftreffendem Lichtstrom zur bestrahlten Fläche und wird in Lux (lx) gemessen. Lichtstärke I_v ist der Lichtstrom, der in eine bestimmte Richtung, pro Raumwinkel, emittiert wird. Die Einheit ist Candela (cd). Leuchtdichte L_v ist der Lichtstrom pro Quellenfläche und pro Raumwinkel und wird in $\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$ gemessen. Das menschliche Auge empfindet Leuchtdichteunterschiede als Helligkeitsunterschiede.

Die wichtigsten radiometrischen und photometrischen Größen sind in Tabelle 4.1 gegenübergestellt. Tabelle 4.2 zeigt typische Beleuchtungsstärken und Leuchtdichten.

Die Grenzwerte optischer Strahlung werden als radiometrische Größen festgelegt. Herstellerangaben bei LED werden allerdings in der Regel als photometrische Größen charakterisiert. Eine exakte Umrechnung von photometrischen zu radiometri-

⁵ Die Symbole für photometrische Größen tragen einen Index "v" (steht für visuell).

schen Größen ist nur dann möglich, wenn die spektrale Verteilung der Quelle bekannt ist. Für LED haben VEES et al. [63] eine vereinfachte Beurteilungsmethode zur approximativen Umrechnung photometrischer zu radiometrischen Größen dargestellt, um die Gefährdungsbeurteilung anhand Informationen aus den LED Datenblättern zu ermöglichen.

Tab. 4.1 Gegenüberstellung der wichtigsten radiometrischen und photometrischen Größen

Radiometrische Größe	Photometrische Größe
Strahlungsleistung, Φ Energie, die sich in der Form einer elektromagnetischen Welle pro Zeiteinheit ausbreitet. Einheit: Watt (W)	Lichtstrom, Φ_v Strahlungsleistung einer Quelle, gewichtet mit der Hellempfindlichkeitskurve $V(\lambda)$ und multipliziert mit K_m . Einheit: Lumen (lm)
Bestrahlungsstärke, E Strahlungsleistung pro Empfängerfläche Einheit: $W \cdot m^{-2}$	Beleuchtungsstärke, E_v Lichtstrom pro Empfängerfläche Einheit: Lux (lx), $1 \text{ lx} = 1 \text{ lm} \cdot m^{-2}$
Strahlstärke, I Strahlungsleistung pro Raumwinkel Einheit: $W \cdot sr^{-1}$	Lichtstärke, I_v Lichtstrom pro Raumwinkel Einheit: Candela (cd), $1 \text{ cd} = 1 \text{ lm} \cdot sr^{-1}$
Strahldichte, L Strahlungsleistung pro Quellenfläche und pro Raumwinkel Einheit: $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$	Leuchtdichte, L_v Lichtstrom pro Quellenfläche und pro Raumwinkel Einheit: $lm \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} = cd \cdot m^{-2}$

Tab. 4.2 Typische Beleuchtungsstärken und Leuchtdichten (aus [71])

Beleuchtungsstärke/lx		Leuchtdichte/ $cd \cdot m^{-2}$	
Heller Sonnentag	100 000	Sonnenscheibe am Mittag	$1,6 \cdot 10^9$
Operationssaal	10 000	Weißlicht emittierende LED	$5,0 \cdot 10^7$
Büroarbeitsplatz	500	Draht einer Halogenlampe	$3,0 \cdot 10^7$
Straßenbeleuchtung	10	60 W Glühlampe (matt)	$1,2 \cdot 10^5$
Kerze, etwa 1 m entfernt	1	Kaltweiße Fluoreszenzröhre	$1,1 \cdot 10^4$
Vollmondnacht	0,25	Oberfläche des Mondes	$2,5 \cdot 10^3$

5 Gesetzliche Regelungen bezüglich inkohärenter optischer Strahlung

Gesetzliche Grundlage für die Sicherheit der Beschäftigten in Bezug auf künstliche optische Strahlung in Deutschland ist die Arbeitsschutzverordnung zu künstlicher optischer Strahlung (OstrV) [65]. Mit dieser auf die §§ 18 und 19 des Arbeitsschutzgesetzes [3] gestützten Verordnung setzte die Bundesregierung die Europäische Arbeitsschutzrichtlinie 2006/25/EG „Künstliche optische Strahlung“ [49] in nationales Recht um. Die wesentlichen Bestimmungen der Verordnung und der EU-Richtlinie werden im Folgenden kurz erläutert.

5.1 Arbeitsschutzverordnung zu künstlicher optischer Strahlung (OStrV)

Die Verordnung zum Schutz der Beschäftigten vor Gefährdungen durch künstliche optische Strahlung ist im Juli 2010 in Kraft getreten. Durch die Umsetzung dieser Verordnung in den Betrieben sollen durch künstliche optische Strahlung verursachte Augen- und Hautschäden der Beschäftigten vermieden werden. Die Bestimmungen der Verordnung beziehen sich dabei jedoch nicht nur auf die Beschäftigten, sondern auch auf Schülerinnen und Schüler, Studierende und sonstige in Ausbildungseinrichtungen tätige Personen, die bei ihren Tätigkeiten künstlicher optischer Strahlung ausgesetzt sind.

Nach der § 3 der OstrV hat der Arbeitgeber zunächst festzustellen, ob Beschäftigte am Arbeitsplatz optischer Strahlung aus künstlichen Quellen ausgesetzt sind. Ist dies der Fall, hat er alle hiervon ausgehenden Gefährdungen für die Gesundheit und Sicherheit der Beschäftigten zu beurteilen. Der Arbeitgeber hat die Exposition durch künstliche optische Strahlung zu ermitteln und zu bewerten. Für die Beschäftigten ist in jedem Fall eine Gefährdung gegeben, wenn die Expositionsgrenzwerte überschritten werden. In der OStrV wird auf die Expositionsgrenzwerte für inkohärente optische Strahlung und Laserstrahlung verwiesen, die in den Anhängen der EU-Richtlinie „Künstliche optische Strahlung“ enthalten sind.

Bei der Gefährdungsbeurteilung können die Herstellerdaten zur Emission von optischer Strahlung den Arbeitgeber unterstützen: die Einteilung in Laserklassen bei Lasern und in Risikogruppen bei Quellen inkohärenter optischer Strahlung. Bei einigen Herstellern von LED sind bereits in den Datenblättern die entsprechenden Risikogruppen nach der Norm DIN EN 62471 „Photobiologische Sicherheit von Lampen und Lampensystemen“ [15] angegeben.

Lässt sich anhand dieser Informationen nicht sicher feststellen, ob die Expositionsgrenzwerte eingehalten werden, hat der Arbeitgeber den Umfang der Exposition durch Messungen und/oder Berechnungen festzustellen. Die Gefährdungsbeurteilung, Messungen und Berechnungen müssen von fachkundigen Personen nach dem Stand der Technik geplant und durchgeführt werden. Relevante Norm zur Mess- und/oder Berechnungsmethodik hinsichtlich Laserstrahlung ist die Lasersicherheitsnorm DIN EN 60825-1 „Sicherheit von Lasereinrichtungen - Teil 1: Klassifizierung

von Anlagen und Anforderungen“ [12]. Hinsichtlich inkohärenter optischer Strahlung kann die Methodik angewandt werden, die in der schon erwähnten Norm DIN EN 62471 (UV, sichtbare und IR-Strahlung), sowie in den Normen DIN EN 14255-1 [10] für UV-Strahlung und DIN EN 14255-2 [11] für sichtbare und IR-Strahlung beschrieben wird.

Der Arbeitgeber muss die Gefährdungsbeurteilung vor Aufnahme einer Tätigkeit durchführen und die erforderlichen Schutzmaßnahmen treffen. Die Gefährdungsbeurteilung ist regelmäßig zu überprüfen und gegebenenfalls zu aktualisieren, insbesondere dann, wenn maßgebliche Veränderungen der Arbeitsbedingungen dies erforderlich machen. Die Ergebnisse der Gefährdungsbeurteilung und die Schutzmaßnahmen sind zu dokumentieren. Für eine Exposition durch künstliche UV-Strahlung sind diese Unterlagen mindestens 30 Jahre aufzubewahren.

Bei einer möglichen Überschreitung der Expositionsgrenzwerte sind die entsprechenden Schutzmaßnahmen festzulegen. An erster Stelle steht der Ersatz durch weniger gefährliche Verfahren oder Geräte, danach kommen technische Maßnahmen, die Vorrang vor organisatorischen Maßnahmen haben. Persönliche Schutzausrüstung (PSA) ist erst dann zu anwenden, wenn technische oder organisatorische Maßnahmen nicht ausreichen oder nicht anwendbar sind. Der Arbeitgeber hat Arbeitsbereiche zu kennzeichnen, in denen die Expositionsgrenzwerte für künstliche optische Strahlung überschritten werden können.

Bei Gefährdungen der Beschäftigten durch künstliche optische Strahlung stellt der Arbeitgeber sicher, dass die betroffenen Beschäftigten eine Unterweisung erhalten, die auf den Ergebnissen der Gefährdungsbeurteilung beruht. Sie muss vor Aufnahme der Beschäftigung, danach in regelmäßigen Abständen, mindestens jedoch jährlich erfolgen.

Können bei Tätigkeiten am Arbeitsplatz die Expositionsgrenzwerte überschritten werden, stellt der Arbeitgeber sicher, dass die betroffenen Beschäftigten arbeitsmedizinisch beraten werden. Sie sind dabei über den Zweck der arbeitsmedizinischen Vorsorgeuntersuchungen zu informieren sowie darüber, unter welchen Voraussetzungen sie Anspruch darauf haben. Dabei regelt die Verordnung zur arbeitsmedizinischen Vorsorge (ArbMedVV) [64], wann die arbeitsmedizinische Vorsorgeuntersuchungen anzubieten oder durchzuführen sind. Der Arbeitgeber hat den Beschäftigten Angebotsuntersuchungen zu ermöglichen, wenn am Arbeitsplatz die Expositionsgrenzwerte nach § 6 der OStrV überschritten werden können. Wenn am Arbeitsplatz die Expositionsgrenzwerte nach § 6 der OStrV definitiv überschritten werden, hat der Arbeitgeber die Pflichtuntersuchungen zu veranlassen.

Der Ausschuss für Betriebssicherheit (ABS) wird im Auftrag des Bundesministeriums für Arbeit und Soziales (BMAS) die Technischen Regeln zur OStrV erarbeiten [51]. Sie sollen die Anforderungen der OStrV konkretisieren und anwenderfreundlicher machen. In Anlehnung an die in der Arbeitsschutzverordnung und in der EU-Richtlinie zu künstlicher optischer Strahlung vorgenommene Unterscheidung in inkohärente optische Strahlung (IOS) und Laserstrahlung sollen jeweils eine technische Regel für IOS und für Laserstrahlung erarbeitet werden. Technische Regeln lösen die sogenannte Vermutungswirkung aus: Durch Anwendung der technischen Regel

kann der Arbeitgeber davon ausgehen, dass die Vorschriften der entsprechenden Arbeitsschutzverordnung erfüllt sind.

5.2 Europäische Richtlinie „Künstliche optische Strahlung“

Die „Europäische Richtlinie 2006/25/EG des Europäischen Parlaments und des Rates über Mindestvorschriften zum Schutz von Sicherheit und Gesundheit der Arbeitnehmer vor Gefährdungen durch physikalische Einwirkungen (künstliche optische Strahlung)“ [49] wurde im April 2006 verabschiedet. Mit dieser Richtlinie wurden in den EU Mitgliedsstaaten die Mindestanforderungen für den Schutz von Arbeitnehmern vor Gefährdungen durch die Einwirkung künstlicher optischer Strahlung während der Arbeit festgelegt. In der Richtlinie sind die Pflichten des Arbeitgebers hinsichtlich der Ermittlung und Bewertung sowie, falls erforderlich, einer Messung und/oder Berechnung des Ausmaßes der optischen Strahlung festgelegt. Die Mess- und/oder Berechnungsmethodik hinsichtlich inkohärenter optischer Strahlung bzw. Laserstrahlung entspricht den dazugehörigen europäischen Normen. Im Auftrag der EU-Kommission hat die britische *Health Protection Agency* einen unverbindlichen Leitfaden zur Erleichterung der Durchführung der Richtlinie 2006/25/EG erstellt [17, 42].

Die EU-Richtlinie enthält die Grenzwerte für die Exposition durch inkohärente optischer Strahlung bzw. Laserstrahlung. Die Expositionsgrenzwerte werden als maximal zulässige Werte bei Exposition der Augen oder der Haut durch künstliche optische Strahlung definiert und basieren auf den von der *International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection* (ICNIRP) veröffentlichten Leitlinien ([26] für inkohärente UV-Strahlung, [27] für inkohärente sichtbare und IR-Strahlung).

Mit der nationalen Umsetzung der EU-Richtlinie über künstliche optische Strahlung durch die entsprechende Arbeitsschutzverordnung (OStrV) sind die in der Richtlinie festgelegten Expositionsgrenzwerte auch in Deutschland rechtsverbindlich. Die Expositionsgrenzwerte für inkohärente optische Strahlung bzw. Laserstrahlung sind in den Anhängen I bzw. II der EU-Richtlinie aufgelistet. Diese Expositionsgrenzwerte berücksichtigen die Art des bestrahlten Gewebes, die mögliche Art der Schädigung, die Wellenlänge der optischen Strahlung sowie die Höhe und die Dauer der Exposition. Physikalische Größen, in denen die Expositionsgrenzwerte angegeben werden, sind die Bestrahlungsstärke, die Strahldichte oder die Bestrahlung. Zum Teil werden diese physikalischen Größen auch noch mit einer für eine bestimmte Schädigungsart angepassten Wirkungsfunktion gewichtet, um die biologische Effektivität der optischen Strahlung in der Schadenswirkung bei verschiedenen Wellenlängen zu berücksichtigen.

Die Expositionsgrenzwerte für inkohärente optische Strahlung sind für den Spektralbereich zwischen 180 nm und 3 000 nm angegeben⁶. Sie gelten jedoch nicht für überdurchschnittlich photosensitive Personen oder Personen, die photosensibilisierenden Substanzen ausgesetzt sind. Die Empfindlichkeit solcher Personen ist sehr

⁶ Unterhalb von 200 nm fängt der Sauerstoff in der Luft an, die UV-Strahlung stark zu absorbieren, so dass ab etwa 180 nm eine freie Ausbreitung der UV-Strahlung in der Luft nicht mehr möglich ist. Deswegen wird in Fragen der optischen Strahlungssicherheit das Spektralgebiet zwischen 100 nm und 180 nm (als Vakuum-UV bezeichnet) nicht berücksichtigt.

unterschiedlich, und es ist nicht möglich, Expositionsgrenzwerte für diesen Anteil der Beschäftigten zu definieren.

Die Expositionsgrenzwerte sind zeitabhängig und sinken für längere Expositionsdauern, allerdings nur bis zu einem bestimmten Wert: Sie bleiben konstant, wenn eine charakteristische Expositionsdauer überschritten wird. Diese charakteristische Expositionsdauer leitet sich z. B. beim photochemischen Wirkungsmechanismus von der Zeit her, ab der Reparaturmechanismen der Schädigung entgegenwirken. Beim thermischen Wirkungsmechanismus leiten sie sich von der Zeit her, ab der sich ein thermisches Gleichgewicht einstellt. Das bedeutet, wenn bis zu einer bestimmten Expositionsdauer keine Schädigung eintritt, wird diese auch bei einer längeren Expositionsdauer nicht eintreten.

Im Folgenden werden die Expositionsgrenzwerte für inkohärente optische Strahlung angegeben, und es wird erläutert, welche physikalischen Größen und Wirkungsfunktionen für die jeweilige photobiologische Gefährdung anzuwenden sind. Für eine Quelle optischer Strahlung können mehrere Expositionsgrenzwerte relevant sein.

5.2.1 Expositionsgrenzwerte für inkohärente optische Strahlung

5.2.1.1 Aktinische UV-Gefährdung der Augen und der Haut

Die Menge der Reaktionsprodukte einer photochemischen Reaktion ist proportional zum Produkt aus Bestrahlungsstärke und Expositionsdauer: Eine hohe Bestrahlungsstärke über eine kurze Zeit kann zur gleichen Wirkung wie eine niedrige Bestrahlungsstärke über eine längere Zeit führen (Dosisprinzip).

Zur Beurteilung einer Gefährdung der Augen und der Haut durch UV-Strahlung im Wellenlängenbereich zwischen 180 nm und 400 nm (sogenannte aktinische UV-Gefährdung) ist die effektive Bestrahlung H_S zu ermitteln, die durch folgende Formel gegeben ist:

$$H_S = \int_0^t E_S(t) \cdot dt \quad (5.1)$$

Dabei ist E_S die effektive Bestrahlungsstärke und t die Expositionsdauer. Ist die Bestrahlungsstärke während des betrachteten Zeitraums t konstant (vgl. Kap. 4.2), gilt:

$$H_S = E_S \cdot t \quad (5.2)$$

Die effektive Bestrahlungsstärke E_S ist die spektrale Bestrahlungsstärke $E(\lambda)$, bewertet mit der spektralen Wirkungsfunktion für aktinische UV-Strahlung $S(\lambda)$ (Abbildung 5.1) und integriert zwischen 180 nm und 400 nm:

$$E_S = \int_{180 \text{ nm}}^{400 \text{ nm}} E(\lambda) \cdot S(\lambda) \cdot d\lambda \quad (5.3)$$

Zum Schutz der Augen und der Haut vor UV-Strahlung gilt im Wellenlängenbereich zwischen 180 nm und 400 nm ein Tagesexpositionsgrenzwert für effektive Bestrahlung von:

$$H_S = 30 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2} \quad (5.4)$$

Dieser Tagesexpositionsgrenzwert gilt für einmalige oder wiederholte Einwirkungen während eines 8-Stunden-Arbeitstages (30 000 s). Die zulässige Expositionsdauer t_{max} in Sekunden für die Zeiten kürzer als 30 000 s ist zu berechnen mit:

$$t_{\text{max}} = \frac{30 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}}{E_S} \quad (5.5)$$

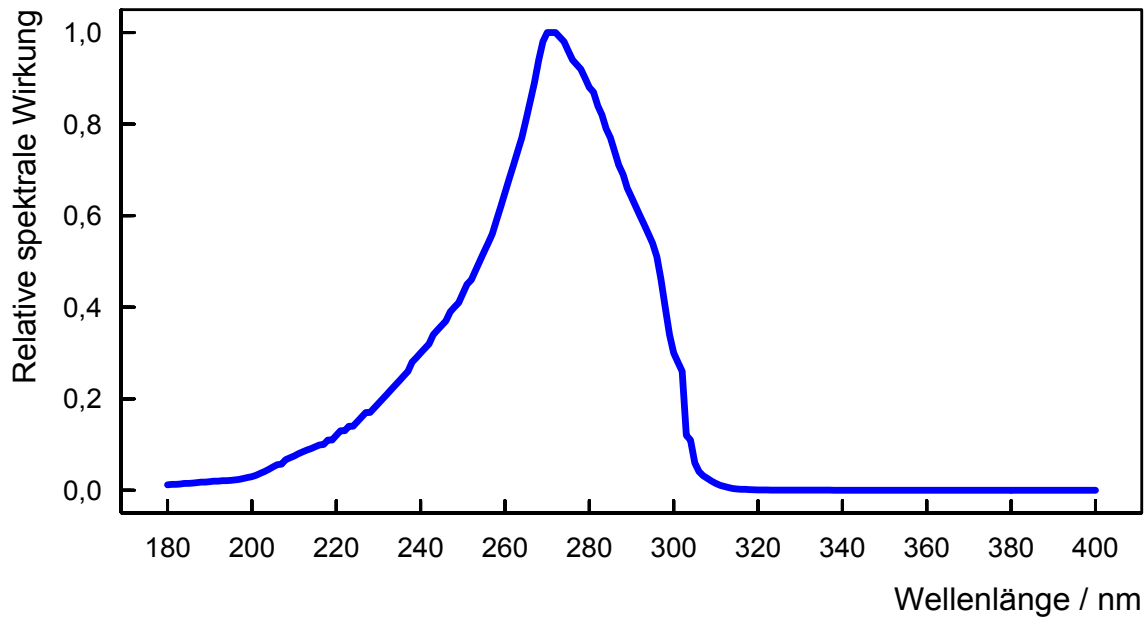


Abb. 5.1 Spektrale Wirkungsfunktion $S(\lambda)$ für aktinische UV-Gefährdung der Augen und der Haut. Das Maximum der Wirkungsfunktion liegt bei 270 nm.

5.2.1.2 Gefährdung der Augen im UV-A-Spektralbereich

Zur Beurteilung einer Gefährdung der Augenlinse durch UV-A-Strahlung im Spektralbereich von 315 nm und 400 nm ist die Bestrahlung H_{UVA} zu ermitteln, die durch die Formel

$$H_{UVA} = \int_0^t E_{UVA}(t) \cdot dt \quad (5.6)$$

gegeben ist. Dabei ist E_{UVA} die Bestrahlungsstärke und t die Expositionsdauer. Ist die Bestrahlungsstärke während des betrachteten Zeitraums t konstant, gilt:

$$H_{UVA} = E_{UVA} \cdot t \quad (5.7)$$

Die Bestrahlungsstärke E_{UVA} ist die unbewertete spektrale Bestrahlungsstärke $E(\lambda)$, integriert zwischen 315 nm und 400 nm:

$$E_{UVA} = \int_{315 \text{ nm}}^{400 \text{ nm}} E(\lambda) \cdot d\lambda \quad (5.8)$$

Zum Schutz vor Schäden der Augenlinse durch UV-A-Strahlung während einer Arbeitszeit von 8 Stunden (30 000 s) darf die Bestrahlung H_{UVA} der Augen den Wert

$$H_{\text{UVA}} = 10^4 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2} \quad (5.9)$$

nicht überschreiten. Die zulässige Expositionsdauer t_{max} in Sekunden für UV-Bestrahlung des ungeschützten Auges für die Zeiten kürzer als 30 000 s ist zu berechnen mit:

$$t_{\text{max}} = \frac{10^4 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}}{E_{\text{UVA}}} \quad (5.10)$$

5.2.1.3 Photochemische Netzhautgefährdung (Blaulichtgefährdung)

Optische Strahlung im Spektralbereich von 300 nm bis 700 nm⁷ kann zu einer photochemischen Schädigung der Netzhaut führen. Dieser Schädigungsmechanismus dominiert über den thermischen Schädigungsmechanismus der Netzhaut für die Expositionsdauer über 10 s.

Zur Beurteilung einer photochemischen Gefährdung der Netzhaut für optische Strahlungsquellen mit einer Winkelausdehnung $\alpha \geq 11$ mrad im Messabstand, ist die effektive Strahldichte L_B für die Blaulichtgefährdung zu ermitteln. Sie ist die mit der spektralen Wirkungsfunktion $B(\lambda)$ für photochemische Netzhautgefährdung bewertete und zwischen 300 nm und 700 nm integrierte spektrale Strahldichte $L(\lambda)$:

$$L_B = \int_{300 \text{ nm}}^{700 \text{ nm}} L(\lambda) \cdot B(\lambda) \cdot d\lambda \quad (5.11)$$

Die Wirkungsfunktion für photochemische Netzhautgefährdung $B(\lambda)$ ist in Abbildung 5.2 dargestellt. Ähnlich wie bei der UV-Strahlung ist die Wirkung kurzwelliger sichtbarer Strahlung für längere Zeiten kumulativ. Beispielweise sind zwei Bestrahlungen von jeweils 50 s als eine Bestrahlung über 100 s zu werten. Liegt die gesamte Expositionsdauer t während einer Arbeitsschicht über 10 000 s, so darf die effektive Strahldichte für Blaulichtgefährdung den Wert

$$L_B = 100 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \quad (5.12)$$

nicht überschreiten. Liegt die addierte Expositionsdauer t bei 10 000 s oder darunter, so gilt für den Expositionsgrenzwert der effektiven Strahldichte für Blaulichtgefährdung:

$$L_B = \frac{10^6}{t} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \quad (5.13)$$

⁷ Der Bereich von 300 nm bis 700 nm beinhaltet Teile der UV-B-Strahlung, die gesamte UV-A-Strahlung und den größten Teil der sichtbaren Strahlung. Die damit verbundene Gefährdung wird als "Blaulichtgefährdung" (Englisch: *Blue-Light-Hazard*) bezeichnet. Blaulicht deckt jedoch streng genommen nur den Bereich von etwa 400 nm bis 490 nm ab.

Wenn die effektive Strahldichte L_B diesen Expositionsgrenzwert übersteigt, wird die maximal zulässige Expositionsdauer t_{\max} in Sekunden folgendermaßen berechnet:

$$t_{\max} = \frac{10^6}{L_B} \quad (5.14)$$

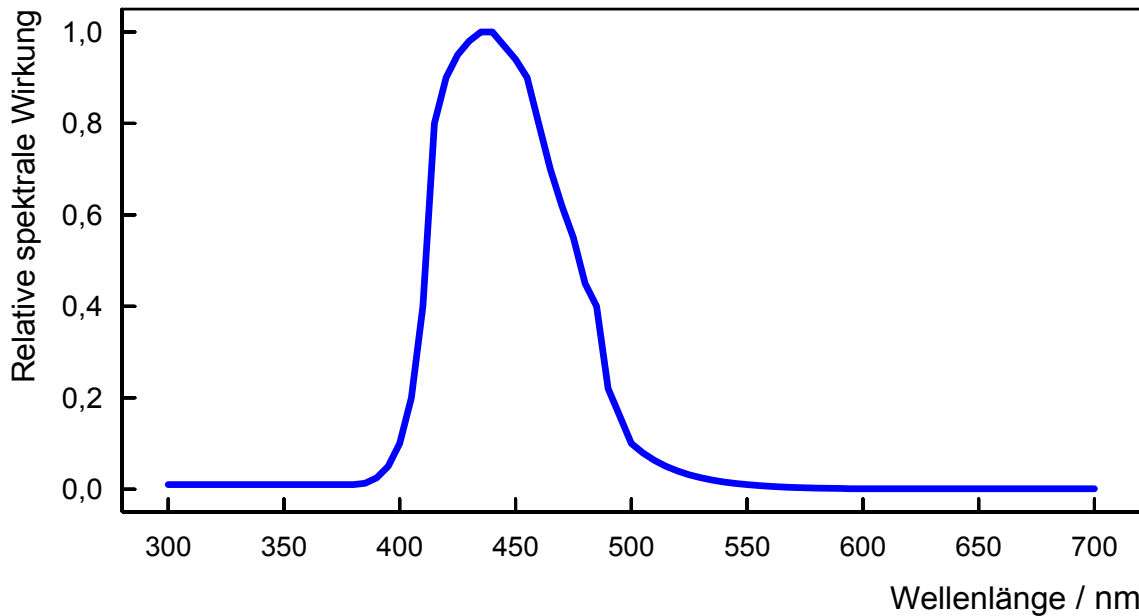


Abb. 5.2 Die spektrale Wirkungsfunktion $B(\lambda)$ für photochemische Netzhautgefährdung hat im Spektralbereich um 435 nm bis 440 nm ihr Maximum

5.2.1.4 Photochemische Netzhautgefährdung - kleine Quelle

Eine kleine Quelle wird als eine optische Strahlungsquelle mit einer Winkelausdehnung α im Messabstand kleiner als 11 mrad definiert. In 20 cm Entfernung entspricht dies einer Quellengröße von 2,2 mm. Für solche Quellen kann man zur Beurteilung einer photochemischen Gefährdung der Netzhaut die in Kapitel 5.2.1.3 für die effektive Strahldichte L_B gegebenen Expositionsgrenzwerte (Formeln (5.12) und (5.13)) in einfacherer Form als effektive Bestrahlungsstärke E_B ausdrücken. Die effektive Bestrahlungsstärke E_B ist die mit der spektralen Wirkungsfunktion für photochemische Netzhautgefährdung $B(\lambda)$ bewertete und zwischen 300 nm und 700 nm integrierte spektrale Bestrahlungsstärke $E(\lambda)$:

$$E_B = \int_{300 \text{ nm}}^{700 \text{ nm}} E(\lambda) \cdot B(\lambda) \cdot d\lambda \quad (5.15)$$

Die folgenden Expositionsgrenzwerte dürfen nicht überschritten werden:

$$E_B = 0,01 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \quad \text{für } t > 10\,000 \text{ s} \quad (5.16)$$

$$E_B = \frac{100}{t} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \quad \text{für } t \leq 10\,000 \text{ s} \quad (5.17)$$

Wenn die effektive Bestrahlungsstärke E_B diesen Expositionsgrenzwert übersteigt, wird die maximal zulässige Expositionsdauer t_{\max} in Sekunden folgendermaßen berechnet:

$$t_{\max} = \frac{100}{E_B} \quad (5.18)$$

Eine stetige Fixierung von sehr kleinen Quellen kommt normalerweise nur bei ophthalmologischen Instrumenten oder einer Augenstabilisierung während einer Betäubung vor.

5.2.1.5 Thermische Netzhautgefährdung

Sichtbare optische Strahlung und IR-Strahlung bis 1 400 nm können zu einer thermischen Netzhautschädigung führen. Dieser Schädigungsmechanismus ist gegenüber der photochemischen Netzhautschädigung bei Wellenlängen über 700 nm und für kürzere Expositionsdauern (≤ 10 s) dominant. Die Expositionsgrenzwerte für thermische Netzhautgefährdung sind für Zeiten ab 10 s konstant. Bei längeren Expositionsdauern wird die Wirkung durch Augenbewegungen abgeschwächt.

Die Hornhaut und die Linse des Auges bilden auf der Netzhaut eine Quelle ab (Abbildung 5.3). Für die Entstehung einer thermischen Netzhautschädigung sind die Bestrahlungsstärke auf der Netzhaut und die Größe des Netzhautbildes entscheidend. Die Wärmeleitung des absorbierenden Gewebes spielt dabei eine wichtige Rolle. Die gleiche Bestrahlungsstärke auf der Netzhaut erzeugt eine unterschiedliche Temperaturerhöhung, je nachdem, wie groß die bestrahlte Fläche ist. Bei einer kleinen Fläche wird die Wärme schneller abgeleitet als bei einer großen Fläche, dadurch wird das thermische Gleichgewicht schneller erreicht.

Die Größe des Netzhautbildes ist wiederum von der Quellengröße abhängig. Die Quellengröße ist proportional zur Winkelausdehnung α , die bereits im Kapitel 4.1 als ebener Winkel, unter dem die Quelle von einem Raumpunkt erscheint, definiert wurde. Die Winkelausdehnung kann durch Verwendung von Linsen verändert werden. In diesem Fall unterscheidet sich die Winkelausdehnung der scheinbaren Quelle von der Winkelausdehnung der tatsächlichen physikalischen Quelle.

Zur Beurteilung einer thermischen Netzhautgefährdung ist die effektive Strahldichte der Quelle L_R zu ermitteln. Sie ist die spektrale Strahldichte der Quelle $L(\lambda)$, bewertet mit der Wirkungsfunktion für thermische Netzhautgefährdung $R(\lambda)$ und integriert zwischen 380 nm und 1 400 nm:

$$L_R = \int_{380 \text{ nm}}^{1400 \text{ nm}} L(\lambda) \cdot R(\lambda) \cdot d\lambda \quad (5.19)$$

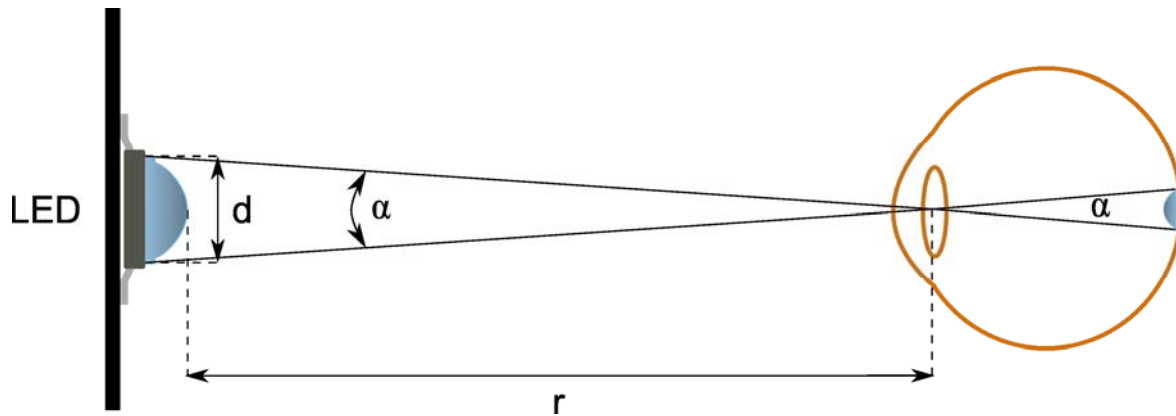


Abb. 5.3 Die Größe des Netzhautbildes wird durch die Winkelausdehnung α beschrieben, die sich aus der Dimension der Quelle d und dem Betrachtungsabstand r ergibt, $\alpha = d/r$

Die spektrale Wirkungsfunktion $R(\lambda)$ für die thermische Netzhaugefährdung ist in Abbildung 5.4 dargestellt. Um die Netzhaut gegen thermische Schädigung zu schützen, darf für Expositionsdauer zwischen $10 \mu\text{s}$ und 10s die effektive Strahldichte L_R den folgenden Grenzwert nicht überschreiten:

$$L_R = \frac{5 \cdot 10^7}{C_\alpha \cdot t^{0,25}} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \quad \text{für } 10 \mu\text{s} < t < 10 \text{s} \quad (5.20)$$

Bei Expositionsdauern über 10s beträgt der Expositionsgrenzwert für die effektive Strahldichte L_R :

$$L_R = \frac{2,8 \cdot 10^7}{C_\alpha} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \quad \text{für } t \geq 10 \text{s} \quad (5.21)$$

Bei Expositionsdauern unter $10 \mu\text{s}$ beträgt der Expositionsgrenzwert für die effektive Strahldichte L_R :

$$L_R = \frac{8,89 \cdot 10^8}{C_\alpha} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \quad \text{für } t \leq 10 \mu\text{s} \quad (5.22)$$

Dabei ist C_α ein Korrekturfaktor, der die Winkelausdehnung α , d. h. die Größe der Quelle, durch die die Temperaturerhöhung beeinflusst wird, berücksichtigt. Es gilt:

$$C_\alpha = \begin{cases} 1,7 & \text{für } \alpha < 1,7 \text{ mrad} \\ \alpha & \text{für } 1,7 \text{ mrad} \leq \alpha \leq 100 \text{ mrad} \\ 100 & \text{für } \alpha > 100 \text{ mrad} \end{cases} \quad (5.23)$$

In die Formeln (5.20), (5.21) und (5.22) ist die Winkelausdehnung α in mrad einzusetzen.

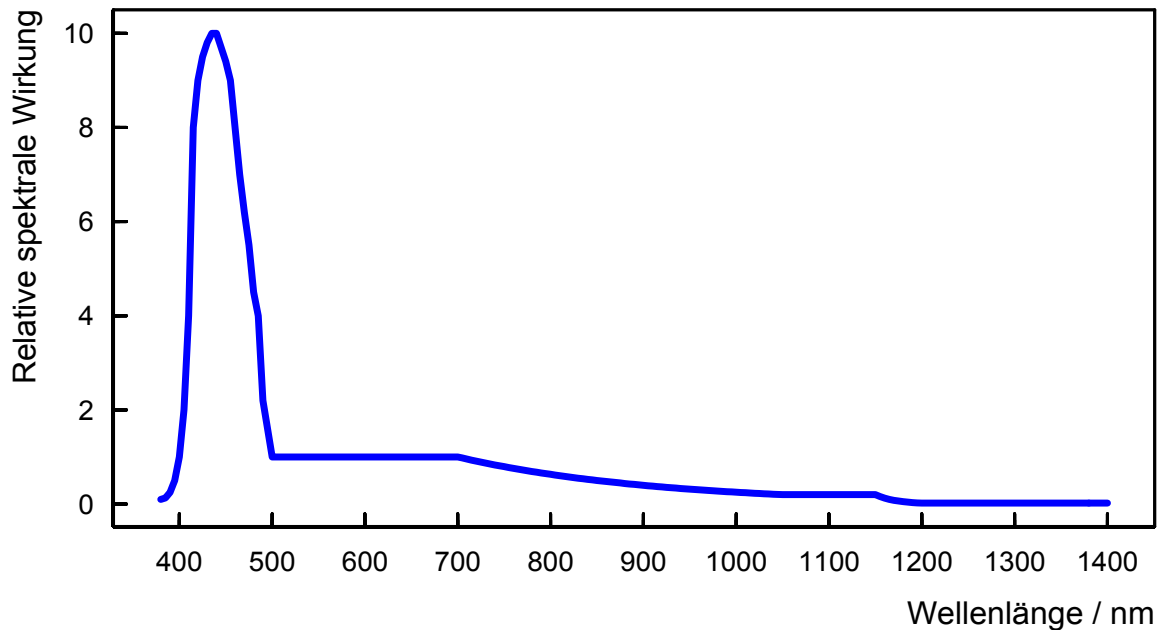


Abb. 5.4 Spektrale Wirkungsfunktion $R(\lambda)$ für thermische Netzhautgefährdung⁸

5.2.1.6 Thermische Netzhautgefährdung - schwacher visueller Reiz

Ein schwacher visueller Reiz ist definiert als ein Reiz, dessen maximale Leuchtdichte (gemittelt über eine kreisförmige Feldblende beschrieben mit einem Empfangswinkel γ von 11 mrad) weniger als $10 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$ beträgt [57]. Bei solchen optischen Strahlungsquellen, bei denen der visuelle Reiz nicht ausreichend ist, um eine Abwendungsreaktion hervorzurufen, ist die effektive Strahldichte

$$L_{\text{IR}} = \int_{780 \text{ nm}}^{1400 \text{ nm}} L(\lambda) \cdot R(\lambda) \cdot d\lambda \quad (5.24)$$

für Expositionsdauer zwischen $10 \mu\text{s}$ und 10 s zu beschränken auf:

$$L_{\text{IR}} = \frac{5 \cdot 10^7}{C_{\alpha} \cdot t^{0,25}} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \quad \text{für } 10 \mu\text{s} < t < 10 \text{ s} \quad (5.25)$$

Für eine Expositionsdauer über 10 s beträgt der Expositionsgrenzwert für die effektive Strahldichte L_{IR} :

$$L_{\text{IR}} = \frac{6 \cdot 10^6}{C_{\alpha}} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \quad \text{für } t \geq 10 \text{ s} \quad (5.26)$$

⁸ In den geplanten Änderungen der ICNIRP Leitlinie für inkohärente optische Strahlung im Spektralbereich von 380 nm bis $3 \mu\text{m}$ [27] wird diese Wirkungsfunktion geändert, indem der Wellenlängenbereich von 420 nm bis 700 nm durchgängig mit 1 bewertet wird [52, 53].

Für eine Expositionsdauer unter 10 μs beträgt der Expositionsgrenzwert für die effektive Strahldichte L_{IR} :

$$L_{\text{IR}} = \frac{8,89 \cdot 10^8}{C_\alpha} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \quad \text{für } t \leq 10 \mu\text{s} \quad (5.27)$$

Dabei beträgt der Korrekturfaktor C_α :

$$C_\alpha = \begin{cases} 11 & \text{für } \alpha < 11 \text{ mrad} \\ \alpha & \text{für } 11 \text{ mrad} \leq \alpha \leq 100 \text{ mrad} \\ 100 & \text{für } \alpha > 100 \text{ mrad} \end{cases} \quad (5.28)$$

Die Winkelausdehnung α der Quelle ist in die Formeln (5.25), (5.26) und (5.27) in mrad einzusetzen. Die Strahldichte ist über ein kreisförmiges Sichtfeld, beschrieben mit einem Empfangswinkel γ von 11 mrad, zu mitteln.

5.2.1.7 IR-Gefährdung der Augen

Zur Beurteilung einer thermischen Gefährdung des Auges im IR-Spektralbereich ist die Bestrahlungsstärke E_{IR} zu ermitteln. Sie ist die zwischen 780 nm und 3 000 nm integrierte spektrale Bestrahlungsstärke $E(\lambda)$:

$$E_{\text{IR}} = \int_{780 \text{ nm}}^{3\,000 \text{ nm}} E(\lambda) \cdot d\lambda \quad (5.29)$$

Die Expositionsgrenzwerte dürfen folgende Werte nicht übersteigen:

$$E_{\text{IR}} = 18\,000 \cdot t^{-0,75} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \quad \text{für } t < 1000 \text{ s} \quad (5.30)$$

$$E_{\text{IR}} = 100 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \quad \text{für } t \geq 1000 \text{ s} \quad (5.31)$$

5.2.1.8 Thermische Gefährdung der Haut

Zur Beurteilung einer thermischen Gefährdung der Haut durch sichtbare und IR-Strahlung im Wellenlängenbereich von 380 nm bis 3 000 nm ist die Bestrahlung H_{H} zu ermitteln, die durch folgende Formel gegeben ist:

$$H_{\text{H}} = \int_0^t E_{\text{H}}(t) \cdot dt \quad (5.32)$$

Ist die Bestrahlungsstärke während des betrachteten Zeitraums t konstant, gilt:

$$H_{\text{H}} = E_{\text{H}} \cdot t \quad (5.33)$$

Dabei ist t die Expositionsdauer und E_H die Bestrahlungsstärke der thermischen Gefährdung der Haut. Sie ist die zwischen 380 nm und 3 000 nm integrierte spektrale Bestrahlungsstärke $E(\lambda)$:

$$E_H = \int_{380 \text{ nm}}^{3000 \text{ nm}} E(\lambda) \cdot d\lambda \quad (5.34)$$

Zum Schutz vor Verbrennungen der Haut durch sichtbare und IR-Strahlung im Wellenlängenbereich von 380 nm bis 3 000 nm gilt der Expositionsgrenzwert für die Bestrahlung von:

$$H = 20\,000 \cdot t^{0,25} \text{ J} \cdot \text{m}^{-2} \quad \text{für } t \leq 10 \text{ s} \quad (5.35)$$

Dieser Expositionsgrenzwert gilt nur für die Bestrahlung von relativ kleinen Hautflächen. Die Expositionsgrenzwerte für die Bestrahlung über 10 s hinaus werden in der EU-Richtlinie „Künstliche optische Strahlung“ nicht definiert, mit der Begründung, dass sich bei Hauttemperaturen, die noch unter der Schädigungsgrenze liegen, starke Schmerzempfindungen einstellen und dadurch die Bestrahlungsdauer beschränkt wird. In der Praxis findet man jedoch durchaus Arbeitsplätze, bei denen Personen aufgrund ihrer Tätigkeit auch länger exponiert sind.

Die zu beurteilende photobiologische Gefährdung mit respektiven Spektralbereichen, physikalischen Größen und Wirkungsfunktionen sind in der Tabelle 5.1, und die Expositionsgrenzwerte für inkohärente optische Strahlung in der Tabelle 5.2 zusammengefasst.

Tab. 5.1 Zusammenfassung der zu beurteilenden photobiologischen Gefährdungen mit respektiven Spektralbereichen, physikalischen Größen und Wirkungsfunktionen

Photobiologische Gefährdung	Wellenlänge/nm	Gefährdung der Augen/der Haut	Physikalische Größe/Wirkungsfunktion
Aktinische UV-Gefährdung der Augen und der Haut	180 - 400 (UV-A, UV-B, UV-C)	Photokonjunktivitis (Bindehautentzündung) Photokeratitis (Hornhautentzündung) Erythem (Hautrötung) UV-Katarakt (Linsentrübung)	Effektive Bestrahlungsstärke, E_S Spektrale Wirkungsfunktion $S(\lambda)$
Gefährdung der Augen im UV-A-Spektralbereich	315 - 400 (UV-A)	UV-Katarakt (Linsentrübung)	Bestrahlungsstärke, E_{UVA}
Photochemische Netzhautgefährdung (Blaulichtgefährdung)	300 - 700 (UV-A-, UV-B, sichtbar)	Photoretinitis (Photochemische Netzhautschädigung)	Effektive Strahldichte, L_B Spektrale Wirkungsfunktion $B(\lambda)$
Photochemische Netzhautgefährdung - kleine Quelle	300 - 700 (UV-B-, UV-A, sichtbar)	Photoretinitis (Photochemische Netzhautschädigung)	Effektive Bestrahlungsstärke, E_B Spektrale Wirkungsfunktion $B(\lambda)$
Thermische Netzhautgefährdung	380 - 1 400 (sichtbar, IR-A)	Netzhautverbrennung	Effektive Strahldichte, L_R Spektrale Wirkungsfunktion $R(\lambda)$
Thermische Netzhautgefährdung - schwacher visueller Reiz	780 - 1 400 (IR-A)	Netzhautverbrennung	Effektive Strahldichte, L_{IR} Spektrale Wirkungsfunktion $R(\lambda)$
IR-Gefährdung der Augen	780 - 3 000 (IR-A, IR-B)	IR-Katarakt (Linsentrübung) Hornhautverbrennung	Bestrahlungsstärke, E_{IR}
Thermische Gefährdung der Haut	380 - 3 000 (sichtbar, IR-A, IR-B)	Hautverbrennung	Bestrahlungsstärke, E_H

Tab. 5.2 Expositionsgrenzwerte für inkohärente optische Strahlung aus der Europäischen Richtlinie 2006/25/EG „Künstliche optische Strahlung“

Photobiologische Gefährdung	Wellenlänge/nm	Expositionsgrenzwert	Anmerkung
Aktinische UV-Gefährdung der Augen und der Haut	180 - 400	$H_S = 30 \text{ J}\cdot\text{m}^{-2}$	Tageswert, 8 Stunden
Gefährdung der Augen im UV-A-Spektralbereich	315 - 400	$H_{UVA} = 10^4 \text{ J}\cdot\text{m}^{-2}$	Tageswert, 8 Stunden
Photochemische Netzhautgefährdung (Blaulichtgefährdung)	300 - 700	$L_B = 100 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$ für $t > 10\,000 \text{ s}$	für $\alpha \geq 11 \text{ mrad}$
		$L_B = \frac{10^6}{t} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$ für $t \leq 10\,000 \text{ s}$	
Photochemische Netzhautgefährdung - kleine Quelle	300 - 700	$E_B = 0,01 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ für $t > 10\,000 \text{ s}$	für $\alpha < 11 \text{ mrad}$
		$E_B = \frac{100}{t} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ für $t \leq 10\,000 \text{ s}$	
Thermische Netzhautgefährdung	380 - 1 400	$L_R = \frac{2,8 \cdot 10^7}{C_\alpha} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$ für $t \geq 10 \text{ s}$	$C_\alpha = 1,7$ für $\alpha < 1,7 \text{ mrad}$
		$L_R = \frac{5 \cdot 10^7}{C_\alpha \cdot t^{0,25}} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$ für $10 \mu\text{s} < t < 10 \text{ s}$	$C_\alpha = \alpha$ für $1,7 \leq \alpha \leq 100 \text{ mrad}$
		$L_R = \frac{8,89 \cdot 10^8}{C_\alpha} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$ für $t \leq 10 \mu\text{s}$	$C_\alpha = 100$ für $\alpha > 100 \text{ mrad}$

Tab. 5.2 Fortsetzung

Photobiologische Gefährdung	Wellenlänge/nm	Expositionsgrenzwert	Anmerkung
Thermische Netzhautgefährdung - schwacher visueller Reiz	780 - 1 400	$L_{IR} = \frac{6 \cdot 10^6}{C_\alpha} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$ für $t \geq 10 \text{ s}$	$C_\alpha = 11$ für $\alpha < 11 \text{ mrad}$
		$L_{IR} = \frac{5 \cdot 10^7}{C_\alpha \cdot t^{0,25}} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$ für $10 \mu\text{s} < t < 10 \text{ s}$	$C_\alpha = \alpha$ für $11 \leq \alpha \leq 100 \text{ mrad}$
		$L_{IR} = \frac{8,89 \cdot 10^8}{C_\alpha} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$ für $t \leq 10 \mu\text{s}$	$C_\alpha = 100$ für $\alpha > 100 \text{ mrad}$ Empfangswinkel $\gamma = 11 \text{ mrad}$
IR-Gefährdung der Augen	780 - 3 000	$E_{IR} = 18\,000 \cdot t^{-0,75} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ für $t < 1\,000 \text{ s}$	
		$E_{IR} = 100 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ für $t \geq 1\,000 \text{ s}$	
Thermische Gefährdung der Haut	380 - 3 000	$H_H = 20\,000 \cdot t^{0,25} \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$ für $t \leq 10 \text{ s}$	

6 Bewertung der photobiologischen Sicherheit von LED nach der Lampensicherheitsnorm DIN EN 62471

Die optischen Eigenschaften der LED weisen im Vergleich zur denen von Lasern und konventionellen Lampen sowohl Ähnlichkeiten als auch Unterschiede auf.

- Während Laserstrahlung kohärent ist, d. h. die emittierten elektromagnetischen Wellen zeitlich und räumlich zusammenhängend sind, ähnelt eine LED einer konventionellen Lampe, da die beiden inkohärente optische Strahlung emittieren.
- Mit ihrer geringen Quellengröße steht eine LED näher zum Laser, der als Punktquelle angenommen werden kann.
- Während Laserstrahlung kollimiert ist (d. h. parallel), ist optische Strahlung einer konventionellen Lampe divergent. Optische Strahlung einer LED ist durch die Bauweise mit einer vorgesetzten Linse nicht so divergent wie die Strahlung einer konventionellen Lampe, aber auch nicht so kollimiert wie Laserstrahlung.

Die Tatsache, dass die Eigenschaften der LED-Strahlung zwischen denen von Lasern und konventionellen Lampen liegen, hat auch Konsequenzen für die Beurteilung ihrer photobiologischen Sicherheit. Zunächst hatte im Jahr 1993 die Internationale Elektrotechnische Kommission (*International Electrotechnical Commission*, IEC) die LED in den Anwendungsbereich der Lasersicherheitsnorm IEC 60825 aufgenommen und sie damit vom Standpunkt der optischen Strahlungssicherheit den Lasern gleichgestellt. Die Laser werden nach der Lasersicherheitsnorm entsprechend ihrer Gefährlichkeit für den Menschen in Klassen eingeteilt. Die Anwendung der Lasersicherheitsnorm auf LED stieß allerdings auf Schwierigkeiten. Es wurde erkannt, dass die Bewertung der photobiologischen Sicherheit von LED nach dem Messverfahren der Lasersicherheitsnorm, das auf gut kollimierte Laserstrahlen ausgerichtet ist, zu einer Überbewertung der Gefährdung der LED führen kann. Deshalb wurde versucht, das Messverfahren auf die divergente optische Strahlung von LED zu adaptieren. Trotz der Verbesserung blieb die Anwendung der Lasersicherheitsnorm auf LED problematisch. Zu der Bewertung der photobiologischen Sicherheit von LED hat die ICNIRP im Jahr 2000 eine Stellungnahme [28] mit der Empfehlung verfasst, auf LED die Expositionsgrenzwerte sowie die Gefährdungsbeurteilung und die entsprechenden Messverfahren für inkohärente Quellen optischer Strahlung anzuwenden.

Letztlich wurden die LED aus der Ausgabe der Lasersicherheitsnorm IEC 60825-1:2007 [25], die in die nationale deutsche Norm DIN EN 60825-1:2008 [12] übernommen wurde, herausgenommen. Die photobiologische Sicherheit von LED wird stattdessen anhand der Lampensicherheitsnorm DIN EN 62471:2009 [15] beurteilt. LED für spezifische Anwendungen, wie etwa LED in der Lichtwellenleiter-technik und IRED zur Freiraum-Datenübertragung verbleiben allerdings noch in der DIN EN 60825-2 [13], bzw. DIN EN 60825-12 [14].

In der international gültigen Lampensicherheitsnorm IEC 62471:2006, die unverändert in die europäische Norm EN 62471 und damit auch in die nationale deutsche Norm DIN EN 62471 [15] übernommen wurde, wird beschrieben, auf welche Weise die photobiologische Sicherheit von Quellen inkohärenter optischer Strahlung, wie Glüh-, Leuchtstoff-, Gasentladungs-, Bogenlampen - sowie jetzt auch LED - bewertet

werden kann. Die Lampensicherheitsnorm IEC 62471, die im Jahr 2006 von der IEC herausgegeben wurde, war identisch mit der schon 2002 herausgegebenen Norm CIE S009 der Internationalen Beleuchtungskommission (*Commission Internationale de L'Eclairage*, CIE). Der ursprüngliche Abschnitt 4 der IEC 62471:2006 enthielt allerdings Regelungen, mit denen die Expositionsgrenzwerte festgelegt wurden, die in den Bereich der Sicherheit und Gesundheit von Arbeitnehmern fallen. Weil innerhalb Europas die Expositionsgrenzwerte für künstliche optische Strahlung nicht in Normen sondern in der europäischen Richtlinie 2006/25/EG festgelegt sind, wurde in der neuen Ausgabe der Lampensicherheitsnorm DIN EN 62471:2009 der ursprüngliche Abschnitt 4 der IEC 62471:2006 in den informativen Anhang verschoben.

In Ergänzung zu IEC 62471 wurde ein Technischer Bericht IEC/TR 62471-2 im Jahr 2009 herausgegeben. Dieser Bericht, in Deutschland als DIN EN 62471 Beiblatt 1:2010 [16] veröffentlicht, bietet Zusatzinformationen bezüglich der Anwendung der Lampensicherheitsnorm DIN EN 62471 und gibt unter anderem Hinweise für Hersteller, wie sie ihre Lampenprodukte kennzeichnen können.

In Deutschland ist die Produktsicherheit durch das Gesetz über die Bereitstellung von Produkten auf dem Markt (Produktsicherheitsgesetz - ProdSG) [19] geregelt. Mit diesem Gesetz wurde die europäische Richtlinie 2001/95/EG über die allgemeine Produktsicherheit [48] in nationales Recht umgesetzt. Das ProdSG hat eine große Bedeutung sowohl für den Verbraucher-, als auch für den Arbeitsschutz und umfasst eine breite Palette von Produkten, einschließlich der Lampen und Lampensysteme.

Nach dem ProdSG dürfen Hersteller, Importeure oder Händler nur Produkte auf den Markt bringen, die so beschaffen sind, dass bei ihrer bestimmungsgemäßen oder vorhersehbaren Verwendung die Sicherheit und Gesundheit von Personen nicht gefährdet werden kann. Im ProdSG ist eine Reihe von Europäischen Richtlinien in deutsches Recht umgesetzt worden, unter anderem auch die Niederspannungsrichtlinie 2006/95/EG [50].

Der Hersteller eines Produktes für den europäischen Binnenmarkt hat gemäß der Richtlinie 2001/95/EG eine Konformitätsbewertung durchzuführen, um damit die Sicherheit des Produktes zu bestätigen. Bei der Konformitätsbewertung müssen die Sicherheitsanforderungen der EU-Richtlinien eingehalten werden. Da diese Richtlinien meistens allgemein gefasst sind, müssen konkrete technische Anforderungen aus Regelwerken abgeleitet werden, die die allgemein anerkannten Regeln der Technik widerspiegeln. Eine Konformitätsvermutung besteht insbesondere, wenn vom Hersteller harmonisierte Normen verwendet wurden. Das sind europäische Normen, die durch die europäischen Normungsorganisationen im Auftrag der Europäischen Kommission erarbeitet werden. Die Harmonisierung von Normen wird im Amtsblatt der Europäischen Union bekannt gegeben. Alle europäischen harmonisierten Normen müssen als nationale Normen umgesetzt werden. Auch internationale Normen können als europäische Normen übernommen und der Europäischen Kommission zur Harmonisierung vorgeschlagen werden. Die harmonisierten Produktnormen werden unter den EU-Richtlinien gelistet. So ist die Lampensicherheitsnorm DIN EN 62471 eine harmonisierte Produktsicherheitsnorm, die unter der Niederspannungsrichtlinie 2006/95/EG gelistet ist. Im Folgenden werden die wesentlichen Anforderungen dieser Norm dargestellt.

Die Arbeitsschutzverordnung zu künstlicher optischer Strahlung verlangt die Bewertung der Exposition und die Einhaltung entsprechender Expositionsgrenzwerte. Da beim Hersteller die zukünftigen Expositionsbedingungen (Abstand zur Quelle, Expositionsdauer) unbekannt sind, erfolgt die Bewertung anhand der von einer Lampe ausgehenden Emission (Abbildung 6.1). Für diese gibt es nach der Lampensicherheitsnorm DIN EN 62471 Emissionsgrenzwerte, die sich auf bestimmte vorhersehbare Expositionsdauern beziehen.

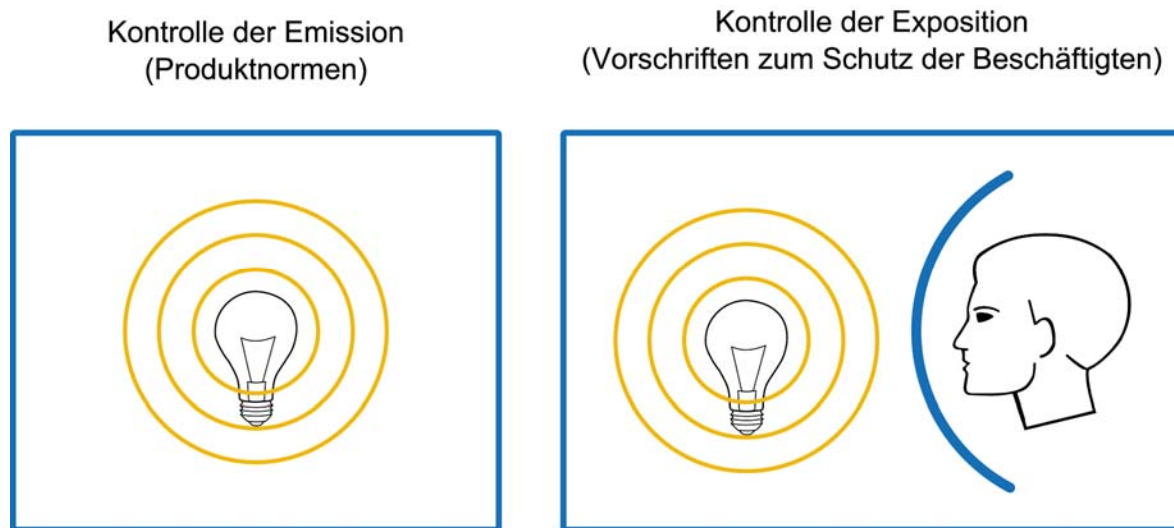


Abb. 6.1 Kontrolle der Emission vs. Kontrolle der Exposition (nach [24])

Anhand der Norm DIN EN 62471 können ungepulste (Dauerstrichlampen) und gepulste Lampen und Lampensysteme⁹ bewertet werden. Dabei wird eine Dauerstrichlampe als eine Lampe definiert, die mit einer kontinuierlichen Strahlungsabgabe über Zeiten länger als 0,25 s betrieben wird. Eine gepulste Lampe ist eine Lampe, die optische Strahlung in Form eines einzelnen Pulses oder eine Pulsfolge abgibt. Jeder Puls hat dabei eine Dauer von weniger als 0,25 s.

Entsprechend ihres Gefährdungspotentials werden die Lampen und Lampensysteme in eine von vier Risikogruppen eingeteilt (Tabelle 6.1). Durch die Zuordnung in eine Risikogruppe erfüllt der Hersteller die gesetzliche Pflicht zur Information des Benutzers über die potenzielle Gefährdung durch sein Produkt. Die Einteilung in eine Risikogruppe gibt Auskunft darüber, wie lange man der optischen Strahlung einer Lampe in einem bestimmten Abstand ausgesetzt sein kann, ohne dass es zur Überschreitung der Emissionsgrenzwerte dieser Risikogruppe kommt. Es besteht kein Risiko (Freie Gruppe), wenn man unbeschränkt der optischen Strahlung der Lampe ausgesetzt sein kann, ein hohes Risiko, wenn schon in kurzer Zeit der Emissionsgrenzwert überschritten wird.

⁹ Lampensysteme können Streukörper, Einhausungen und/oder strahlformende Optiken beinhalten. Strahlformende Optiken sind optische Komponenten wie Linsen, Reflektoren oder Filter, die die Charakteristik der optischen Strahlung einer Lampe verändern.

Tab. 6.1 Risikogruppen für Dauerstrichlampen nach der Lampensicherheitsnorm DIN EN 62471. Dieser Bericht befasst sich nur mit Augengefährdungen durch Dauerstrichlampen.

Lampengruppe	Risiko	Beschreibung
Freie Gruppe	kein	Diese Lampen stellen keine photobiologische Gefährdung dar, auch nicht bei kontinuierlicher, lang andauernder Exposition im Referenzabstand - sie sind unter allen Umständen sicher.
Risikogruppe 1	geringes	Diese Lampen stellen unter Berücksichtigung normalen menschlichen Verhaltens keine Gefährdung dar. In Bezug auf die Augen sind diese Lampen sicher, außer bei einer sehr lang andauernden Betrachtung im Referenzabstand mit direkter Augenexposition.
Risikogruppe 2	mittleres	Die Sicherheit dieser Lampen in Bezug auf die Augen basiert auf Abwendungsreaktionen; sie stellen keine photobiologische Gefährdung dar, solange Abwendungsreaktionen die Expositionsdauer begrenzen.
Risikogruppe 3	hohes	Diese Lampen sind auch bei kurzzeitiger Exposition im Referenzabstand gefährlich.

Die Emissionsgrenzwerte der Risikogruppen wurden von den Expositionsgrenzwerten für verschiedene Gefährdungen hergeleitet, die in der EU-Richtlinie 2006/25/EG über künstliche optische Strahlung festgelegt und in der Tabelle 5.2 dieses Berichtes zusammengefasst sind. Bei Expositionsgrenzwerten für Augengefährdungen wurden *worst case*-Szenarien bezüglich der Nutzungsumstände angelegt, d. h. bei maximaler Pupillenöffnung sowie minimalem Akkommodationsabstand. Jeder Risikogruppe werden maximale vorhersehbare Expositionsdauern in einem Referenzabstand zugeordnet, die je nach Art der photobiologischen Gefährdung unterschiedlich sind. Je höher die Risikogruppe ist, desto kürzer ist die erlaubte Expositionsdauer.

Ein Beispiel: Anhand des Expositionsgrenzwertes der effektiven Strahldichte für Blaulichtgefährdung (Formel (5.13)) erhält man die Emissionsgrenzwerte der effektiven Strahldichte für Blaulichtgefährdung der Risikogruppen:

$$\begin{array}{lll}
 L_B' = 100 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1} & \text{für } t = 10\,000 \text{ s} & \text{(Freie Gruppe)} \\
 L_B' = 10\,000 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1} & \text{für } t = 100 \text{ s} & \text{(Risikogruppe 1)} \\
 L_B' = 4\,000\,000 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1} & \text{für } t = 0,25 \text{ s} & \text{(Risikogruppe 2)}
 \end{array}$$

Die Emissionsgrenzwerte für die Risikogruppen mit entsprechenden Expositionsdauern sind in Tabelle 6.2 wiedergegeben. Für die jeweilige photobiologische Gefährdung steht in der ersten Zeile der Emissionsgrenzwert einer bestimmten Risikogruppe, direkt darunter die maximale Expositionsdauer, für die der Emissionsgrenzwert gültig ist.

Die Einteilung der Lampen in Risikogruppen kann die Gefährdungsbeurteilung am Arbeitsplatz unterstützen. Dabei sind ausschließlich solche Lampen als uneingeschränkt sicher zu betrachten, die in die Freie Gruppe eingestuft sind. Eine Zuordnung zu dieser Gruppe sichert gleichzeitig die Einhaltung der Expositionsgrenzwerte¹⁰. Dies bedeutet, dass man ununterbrochen über einen ganzen Arbeitstag im Referenzabstand direkt in die Lampe „starren“ könnte. Eine Zuordnung zur Freien Gruppe kann dem Anwender aufwendige Messungen/Bewertungen ersparen.

Die Lampen der Risikogruppe 1 sind sicher bei normalem Umgang, d. h. unter der Voraussetzung üblichen Verhaltens und bestimmungsgemäßen Gebrauchs. Bei diesen Lampen ist mit der Überschreitung der Expositionsgrenzwerte nicht zu rechnen, außer für sehr lang andauernde Betrachtung im Referenzabstand mit direkter Augenexposition. Die Lampen der Risikogruppe 1 überschreiten mindestens einen Emissionsgrenzwert der Freien Gruppe.

Die Sicherheit der Lampen der Risikogruppe 2 basiert auf der Auslösung von Abwendungsreaktionen. Damit sind die natürlichen Reaktionen gemeint, die das Auge vor Gefährdungen durch optische Strahlung schützen sollen, insbesondere die Augenbewegung, die unwillkürlich die Pupille des Auges bedeckt (Lidschlussreflex). Bei einer Lampe, die den Emissionsgrenzwert der Risikogruppe 2 erreicht, sollte eine Abwendungsreaktion innerhalb von 0,25 s stattfinden. Allerdings, haben in Untersuchungen mit LED von REIDENBACH et al. [46] aus dem Jahr 2003 nur 23 % der Probanden innerhalb von 0,25 s mit einem Lidschlussreflex reagiert. Daraus folgt, dass eine Zeitbasis von 0,25 s für ein Schutzkonzept nicht ausreichend ist. Vielmehr werden für bewusste Abwendungsreaktionen 2 s - 4 s benötigt. Zusätzlich können auch Medikamente, Drogen oder Krankheiten zur Verzögerung der Auslösung des Lidschlussreflexes führen. Die Lampen der Risikogruppe 2 überschreiten mindestens einen Emissionsgrenzwert der Risikogruppe 1.

Am kritischsten sind die Lampen der Risikogruppe 3, weil hier die Expositionsgrenzwerte definitiv überschritten werden können. Die Lampen der Risikogruppe 3 überschreiten mindestens einen Emissionsgrenzwert der Risikogruppe 2.

Die Lampensicherheitsnorm DIN EN 62471 stellt ein standardisiertes Messverfahren für die Bewertung von möglichen Gefährdungen dar, die von verschiedenen Lampen und Lampensystemen, einschließlich LED, ausgehen können. Die notwendigen Messungen radiometrischer Größen inkohärenter Quellen optischer Strahlung sind komplexer als bei Lasern, weil man es nicht mit einer Punktquelle, sondern mit ausgedehnten Quellen, die außerdem noch durch Projektionsoptiken verändert sein können, zu tun hat. Die Einteilung einer optischen Strahlungsquelle in eine Risikogruppe beruht auf Feststellung der spektralen Bestrahlungsstärke/Strahldichte in einem vorgegebenen Referenzabstand zur Quelle. Bei der Beurteilung der photochemischen und thermischen Gefährdung ist es zudem notwendig, die Größe der scheinbaren Quelle zu bestimmen.

¹⁰ Eine Gefährdungsbeurteilung nach der OStrV im UV-A-Spektralbereich kann allerdings zu dem Ergebnis kommen, dass eine optische Strahlungsquelle der Freien Gruppe nicht uneingeschränkt sicher ist. Dies ist auf eine Diskrepanz bei der Festlegung der Expositions- und Emissionsgrenzwerte zurückzuführen (siehe 7.2).

Tab. 6.2 Emissionsgrenzwerte der Risikogruppen mit entsprechenden maximalen Expositionsdauern für Dauerstrichlampen nach der Lampensicherheitsnorm DIN EN 62471

Photobiologische Gefährdung	Emissionsgrenzwert/ Expositionsdauer	Freie Gruppe	Risikogruppe 1	Risikogruppe 2
Aktinische UV-Gefährdung der Augen	Emissionsgrenzwert - effektive Bestrahlungsstärke $E_S' / W \cdot m^{-2}$ Expositionsdauer / s	0,001 30 000 (8 h)	0,003 10 000	0,03 1 000
Gefährdung der Augen im UV-A-Spektralbereich	Emissionsgrenzwert - Bestrahlungsstärke $E_{UVA}' / W \cdot m^{-2}$ Expositionsdauer / s	10 1 000 (16 min)	33 300	100 100
Photochemische Netzhautgefährdung (Blaulichtgefährdung)	Emissionsgrenzwert - effektive Strahlendichte $L_B' / W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$ Expositionsdauer / s	100 10 000 (2 h 47 min)	10 000 100	4 000 000 0,25
Photochemische Netzhautgefährdung - kleine Quelle	Emissionsgrenzwert - effektive Bestrahlungsstärke $E_B' / W \cdot m^{-2}$ Expositionsdauer / s	1 (gemessen mit $\gamma = 100$ mrad) 10 000	1 100	400 0,25
Thermische Netzhautgefährdung	Emissionsgrenzwert - effektive Strahlendichte $L_R' / W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$ Expositionsdauer / s	28 000 000/ α 10	28 000 000/ α 10	71 000 000/ α 0,25
Thermische Netzhautgefährdung - schwacher visueller Reiz	Emissionsgrenzwert - effektive Strahlendichte $L_{R'}' / W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$ Expositionsdauer / s	6 000 000/ α > 10	6 000 000/ α > 10	6 000 000/ α > 10
IR-Gefährdung der Augen	Emissionsgrenzwert - Bestrahlungsstärke $E_{IR}' / W \cdot m^{-2}$ Expositionsdauer / s	100 1 000	570 100	3 200 10

Anmerkung 1: Bei der Berechnung der Emissionsgrenzwerte für thermische Netzhautgefährdung ist α in mrad einzusetzen.

Anmerkung 2: Bei der Beurteilung der thermischen Netzhautgefährdung beträgt die Zeitbasis für die Freie Gruppe und für die Risikogruppe 1 10 s. Deswegen ergibt sich für beide Risikogruppen der gleiche Emissionsgrenzwert. Wenn die gemessene effektive Strahlendichte einer optischen Strahlungsquelle diesen Emissionsgrenzwert nicht übersteigt, wird diese Quelle in die Freie Gruppe eingeteilt, da dies die niedrigere Risikogruppe ist. Das bedeutet, dass es bezüglich der thermischen Netzhautgefährdung praktisch keine Risikogruppe 1 gibt.

6.1 Messung der Bestrahlungsstärke

Bestrahlungsstärkemessungen dienen der Beurteilung folgender photobiologischen Gefährdungen:

- aktinische UV-Gefährdung der Augen;
- Gefährdung der Augen im UV-A-Spektralbereich;
- photochemische Netzhautgefährdung - kleine Quelle;
- IR-Gefährdung der Augen.

Eine Schematische Darstellung des Messprinzips zur Bestimmung der Bestrahlungsstärke zeigt die Abbildung 6.2. Für die Messungen der spektralen Bestrahlungsstärke ist eine Eingangsoptik zu verwenden, die hinsichtlich der räumlichen Winkelempfindlichkeit das Lambertsches Kosinusgesetz¹¹ [57] erfüllt. Das kann entweder eine Kosinus-Eingangsoptik oder eine Ulbricht-Kugel sein.

Bei der Messung mit einem Monochromator wird in der Norm als Eingangsoptik eine Ulbricht-Kugel empfohlen. Die in der Ulbricht-Kugel gestreute optische Strahlung ist nahezu ideal diffus, sie erfüllt das Lambertsches Kosinusgesetz. Sie ermöglicht es, die gesamte Strahlungsleistung (oder den gesamten Lichtstrom) zu messen, ohne dass durch deren Richtcharakteristik die Messungen verfälscht werden. Es handelt sich um eine von innen diffus reflektierende Hohlkugel, in deren Oberfläche sich eine Austrittsöffnung befindet. Vor der Eintrittsöffnung befindet sich die optische Strahlungsquelle. Die Durchmesser möglicher Öffnungen sind deutlich kleiner als der Innendurchmesser der Kugel, so dass nur die optische Strahlung in die Austrittsebene gelangt, die zuvor vielfach an der inneren Oberfläche reflektiert worden ist.

Bei Quellen, die eine räumlich homogene Bestrahlungsstärke erzeugen, ist ein Durchmesser der Messblende, in diesem Fall ist das die der Eingangsöffnung der Ulbricht-Kugel, von 25 mm üblich. Für inhomogene Quellen, wie LED, soll die Eingangsöffnung auf einen Durchmesser von 7 mm beschränkt sein, da dadurch *hot spots*, d. h. Punkte erhöhter Emission, besser lokalisiert werden können. Die Verwendung einer zu großen Eingangsoptik könnte zu einer Unterbewertung der Gefährdung führen.

Bei den Messungen der Bestrahlungsstärke zur Bewertung der photobiologischen Gefährdung der Augen ist eine Feldblende einzusetzen, so dass ein Empfangswinkel von 1,4 rad (80°) entsteht (Tabelle 6.3). Eine Feldblende beschränkt den beleuchteten Bereich auf der Quelle. Dies ist nur relevant für Quellen, die einen Winkel größer als 1,4 rad aufspannen. Bei kleineren Quellen, wie bei LED, ist keine Feldblende notwendig. Ausnahme sind Messungen zur Beurteilung der photochemischen Netzhautgefährdung für kleine Quellen, die der alternativen Strahldichte-Messmethode entsprechen (siehe Abschnitt 6.2.2.2).

¹¹ Ein Lambertscher Strahler emittiert optische Strahlung richtungsunabhängig. Im sichtbaren Spektralbereich erscheint so ein Strahler unter allen Beobachtungswinkeln gleich hell.

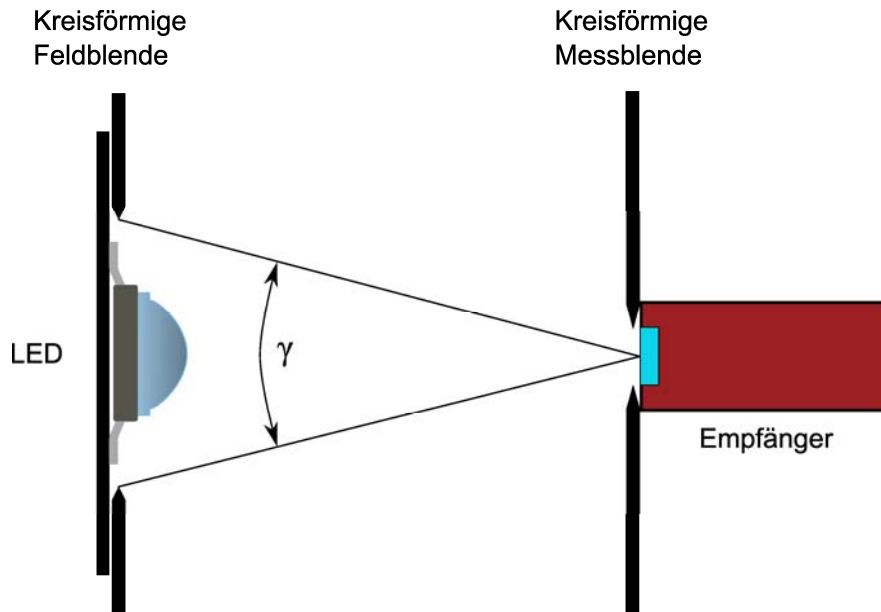


Abb. 6.2 Messprinzip zur Messung der Bestrahlungsstärke

Tab. 6.3 Limitierende Feldblende zur Beurteilung der photobiologischen Gefährdungen, die auf Messungen der Bestrahlungsstärke basieren

Photobiologische Gefährdung	Feldblende/rad
Aktinische UV-Gefährdung der Augen	1,4
Gefährdung der Augen im UV-A-Spektralbereich	1,4
Photochemische Netzhautgefährdung - kleine Quelle	< 0,011
IR-Gefährdung der Augen	1,4

6.2 Messung der Strahldichte

Strahldichtemessungen dienen der Beurteilung folgender Gefährdungen:

- photochemische Netzhautgefährdung;
- thermische Netzhautgefährdung;
- thermische Netzhautgefährdung - schwacher visueller Reiz.

6.2.1 Grundlegendes zur Strahldichtemessung

Für die Entstehung einer Netzhautschädigung ist die Größe der bestrahlten Netzhautfläche von entscheidender Bedeutung. Die kleinste Abbildung auf der Netzhaut ist sogar für eine punktförmige Quelle bei einem unbewegten Auge aufgrund der physikalischen Einschränkungen auf eine minimale Winkelausdehnung von 1,7 mrad beschränkt. Die Fixation durch das Auge dauert sehr kurz, zwischen 150 ms und 400 ms, und wird von spontanen, sprungartigen Sakkaden mit Winkeln zwischen 1° und 5° zwei- bis dreimal pro Sekunde unterbrochen. Diese unwillkürlichen Augenbewegungen führen dazu, dass auch die von punktförmigen Quellen emittierte Strahlungsleistung in kurzer Zeit über eine größere Netzhautfläche verteilt wird, was zu einer kleineren effektiven Bestrahlungsstärke auf der Netzhaut und damit zu vermindertem Risiko für eine Netzhautschädigung führt [39] (Abbildung 6.3). Nach einer Expositionsdauer von 10 s bedeckt das verschmierte Bild einer punktförmigen Quelle eine Fläche auf der Netzhaut, die einem Winkel von etwa 11 mrad entspricht.

Für Zeiten länger als 100 s bricht die Fähigkeit, fokussiert auf einen Punkt zu starren, zusammen, was eine weitere Verteilung der Strahlungsleistung über die Netzhaut zur Folge hat. Der Durchmesser der bestrahlten Netzhautfläche nimmt dabei mit der Quadratwurzel der Zeit zu. Für eine Expositionsdauer von etwa 10 000 s erreicht das verschmierte Bild einer punktförmigen Quelle eine Fläche auf der Netzhaut, die einem Winkel von etwa 100 mrad entspricht.

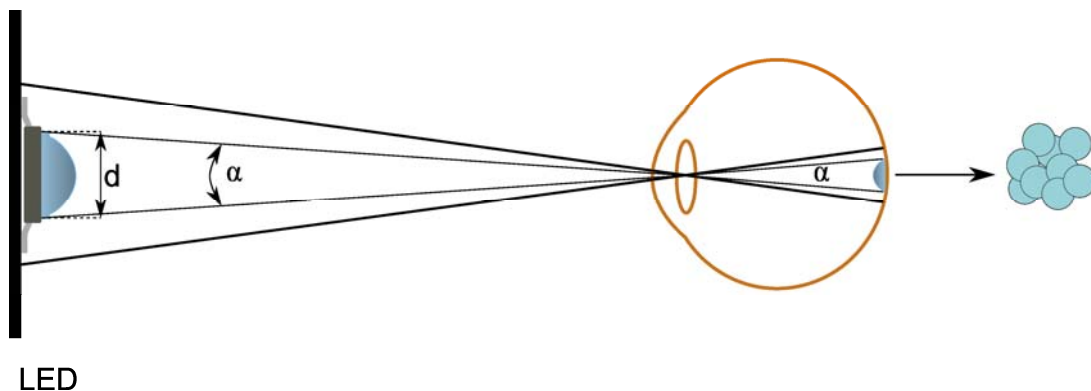


Abb. 6.3 Augenbewegungen führen bei steigender Expositionsdauer dazu, dass die Abbildung einer Quelle über eine größere Netzhautfläche „verschmiert“ wird und dadurch das Risiko für eine Netzhautschädigung verringert wird

Die Regelungen zur optischen Strahlungssicherheit berücksichtigen den Effekt des verminderten Risikos durch Augenbewegungen, indem für eine längere Expositionsdauer ein größerer Empfangswinkel γ vorgegeben ist, der vom Detektor „gesehen“ wird. Der Empfangswinkel γ nimmt je nach vorgesehener Expositionsdauer Werte von 1,7 mrad ($0,25 \text{ s} \leq t < 10 \text{ s}$), 11 mrad ($10 \text{ s} \leq t < 100 \text{ s}$) und 100 mrad ($100 \text{ s} \leq t < 10\,000 \text{ s}$) an.

Im Falle der photochemischen Netzhautgefährdung bleibt oberhalb von 10 000 s der Empfangswinkel zeitunabhängig, weil dann körpereigene Reparaturprozesse die Schadenswirkungen kompensieren.

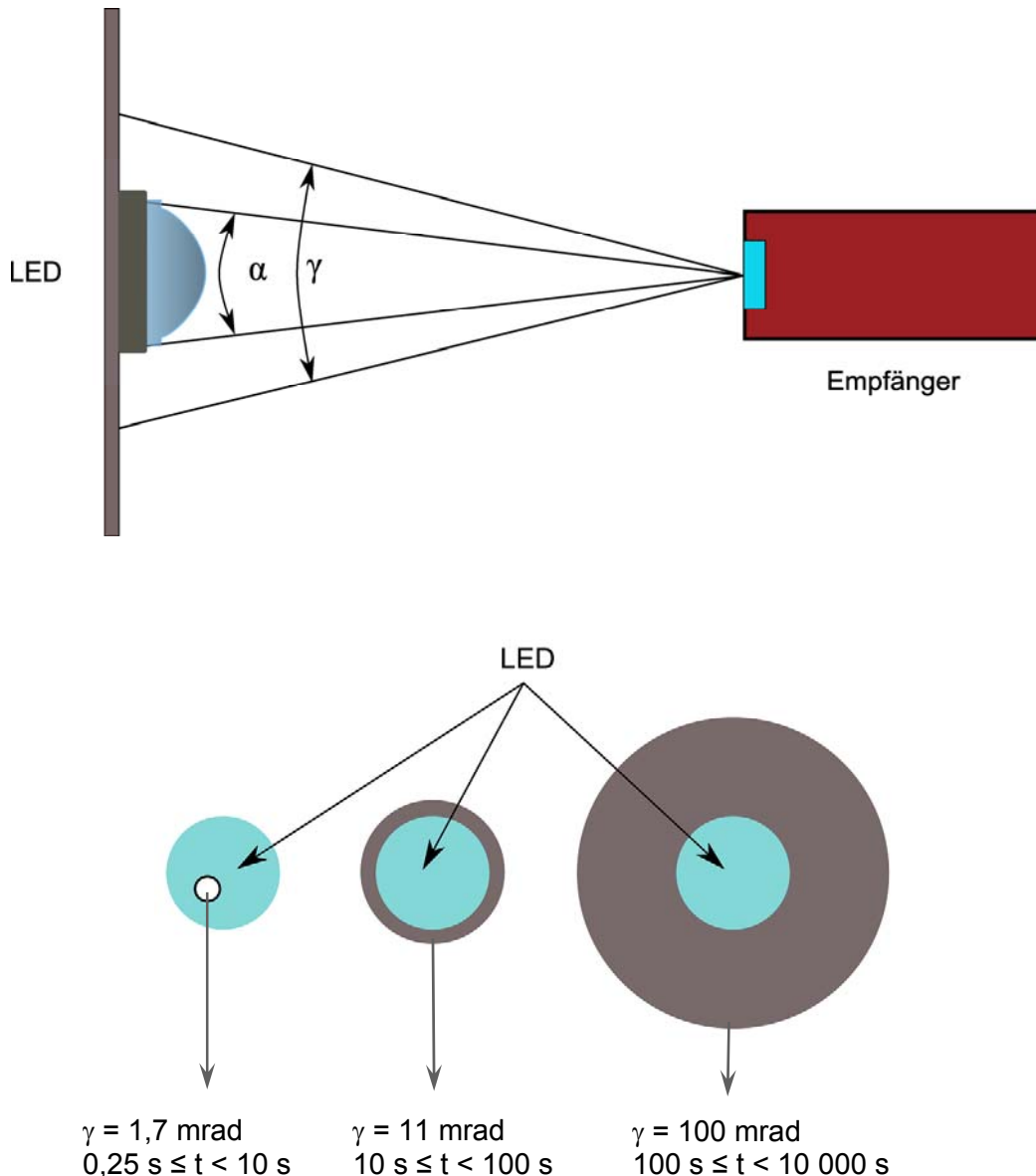


Abb. 6.4 Drei unterschiedliche Empfangswinkel γ (1,7 mrad, 11 mrad und 100 mrad) simulieren die voraussichtliche Expositionsdauer. Die Größe des Empfangswinkels steht im Zusammenhang mit den Augenbewegungen, die die Strahlungsleistung der Quelle über eine größere Netzhautfläche verteilt.

Wie schon in Kapitel 4 betont, ist die Größe des Empfangswinkels γ unabhängig von der Winkelausdehnung der Quelle α . Bei optischen Quellen mit einer Winkelausdehnung α kleiner als der angegebene Empfangswinkel γ (z. B. Einzel-LED), wird sich bei den Messungen eine gemittelte Strahldichte ergeben, die kleiner ist als die tatsächliche, physikalische Strahldichte der Quelle. Nach der Lampensicherheitsnorm ist jedoch dieser gemittelte Wert mit dem entsprechenden Emissionsgrenzwert zu vergleichen, da sonst die Gefährdung überbewertet werden kann. Für Quellen, die einen Winkel größer als den Empfangswinkel γ von 100 mrad aufspannen, sind die Messergebnisse unabhängig vom angewandten Empfangswinkel γ .

Tabelle 6.4 fasst die anzuwendenden Empfangswinkel für Strahldichtemessungen bei der Beurteilung der photochemischen und der thermischen Netzhautgefährdung zusammen.

Tab. 6.4 Empfangswinkel zur Messung der Strahldichte bei der Beurteilung der photochemischen und der thermischen Netzhautgefährdung

Photobiologische Gefährdung	Expositionsdauer t	Empfangswinkel γ /mrad
Photochemische Netzhautgefährdung (Blaulichtgefährdung)	$0,25 \text{ s} \leq t < 10 \text{ s}$	1,7
	$10 \text{ s} \leq t < 100 \text{ s}$	11
	$100 \text{ s} \leq t < 10\,000 \text{ s}$	100
Thermische Netzhautgefährdung	$0,25 \text{ s} \leq t < 10 \text{ s}$	1,7
	$10 \text{ s} \leq t < 100 \text{ s}$	11
Thermische Netzhautgefährdung - schwacher visueller Reiz	$t > 10 \text{ s}$	11

6.2.2 Messvorgang zur Messung der Strahldichte

Bei den Messungen der Strahldichte können zwei Methoden angewendet werden: Der Empfangswinkel γ kann durch eine Feldblende vor dem Detektor (Standardmethode) oder vor der optischen Quelle (alternative Methode) realisiert werden.

6.2.2.1 Standardmethode

Bei der Standardmethode wird mithilfe eines optischen Systems die optische Quelle auf einem Detektor bzw. einer kreisförmigen Feldblende abgebildet. Durch die Feldblende wird der Empfangswinkel γ realisiert, eine kreisförmige Messblende wirkt als Pupille des Auges. Wie bei Bestrahlungsstärkemessungen entspricht der kleinste Durchmesser der Messblende einem Durchmesser der Pupille von 7 mm und ist eine anerkannte Mittelungsblende für kontinuierliche Quellen (Dauerstrichlampen), bei denen die Pupille auch kleiner sein könnte, aber Augen- und Kopfbewegungen diese Mittelungsblende ergeben. Wie bei Bestrahlungsstärkemessungen kann für Quellen, die eine räumlich homogene Bestrahlungsstärke aufweisen, der Durchmesser der Messblende 7 mm übersteigen.

Die Abbildung 6.5 illustriert das Messprinzip für die Strahldichtemessung. Für kleine Winkel ist die Beziehung zwischen dem Durchmesser der Feldblende d_1 und der Bildweite b :

$$\gamma = \frac{d_1}{b} \quad (6.1)$$

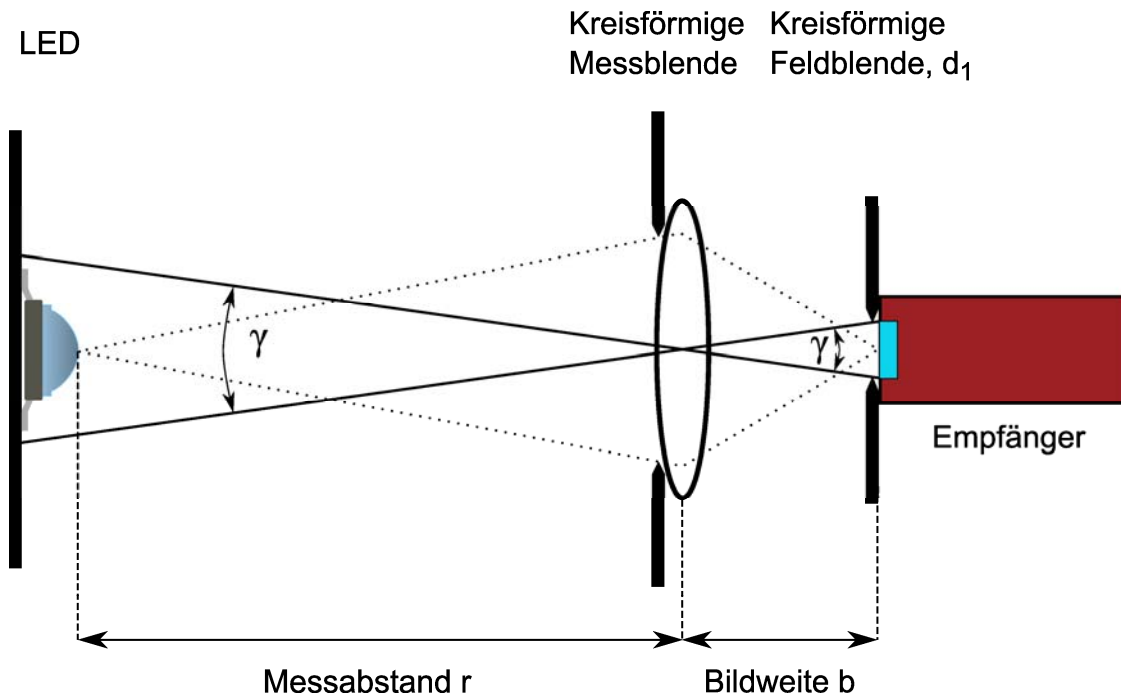


Abb. 6.5 Messprinzip für Strahldichtemessungen nach der Standardmethode

6.2.2.2 Alternative Methode

Bei der alternativen Strahldichtemessung handelt es sich um eine Bestrahlungsstärkemessung mit einem definierten Empfangswinkel γ . Um den Strahldichtemesswert zu erhalten, wird der Bestrahlungsstärkemesswert durch den Raumwinkel, der sich aus dem ebenen Empfangswinkel γ berechnen lässt, dividiert. Diese Methode sollte nur dann angewendet werden, wenn die kreisförmige Feldblende, die zur Realisierung des Empfangswinkels γ dient, nahe genug an der Quelle platziert werden kann [68].

Die Feldblende mit dem Durchmesser d_2 wird dabei direkt vor der Quelle positioniert (Abbildung 6.6). Für kleine Winkel gilt:

$$\gamma = \frac{d_2}{r} \quad (6.2)$$

Dabei ist r der Messabstand. Die Beziehung zwischen der gemessenen Bestrahlungsstärke E und der Strahldichte der Quelle L ist gegeben durch:

$$E = L \cdot \Omega \quad (6.3)$$

Hier ist Ω der Raumwinkel, der durch den ebenen Empfangswinkel γ aufgespannt wird. Für kleine kreisförmige Quellen ist der Zusammenhang zwischen dem Raumwinkel Ω und dem Empfangswinkel γ gegeben durch:

$$\Omega = \frac{\pi \cdot \gamma^2}{4} \quad (6.4)$$

Anhand der Formeln (6.3) und (6.4) erhält man die Beziehung zwischen der gemessenen Bestrahlungsstärke E und der benötigten Strahldichte L :

$$L = E \cdot \frac{4}{\pi \cdot \gamma^2} \quad (6.5)$$

Durch Anwendung der Formel (6.5) kann gezeigt werden, dass für einen Empfangswinkel $\gamma = 11$ mrad der Faktor zwischen L und E ungefähr 10 000 beträgt. Der Expositionsgrenzwert der Bestrahlungsstärke für photochemische Netzhautgefährdung bei kleinen Quellen wurde abgeleitet, indem der Expositionsgrenzwert der Strahldichte durch diesen Wert dividiert wurde (siehe Tabelle 5.2).

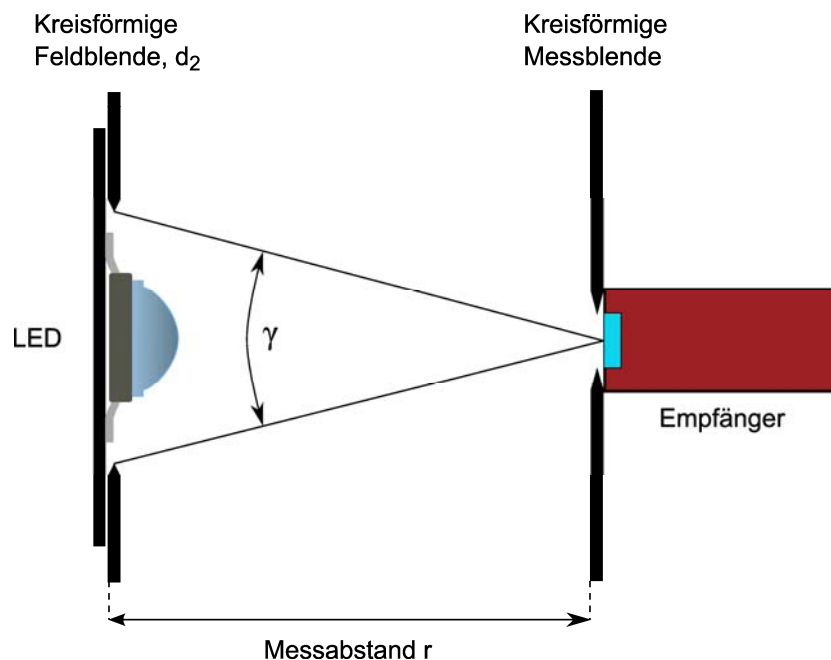


Abb. 6.6 Messprinzip des alternativen Strahldichte-Messverfahrens

6.3 Messung der Quellengröße

Die Bestimmung der Quellengröße dient der Bestimmung der Winkelausdehnung α der Quelle. Die Quellengröße ist aus den 50 %-Emissionspunkten der Quelle zu ermitteln.

Bei LED ist die eigentliche Strahlungsquelle (der Chip) meist zusammen mit Reflektoren und/oder Linsen in einem Plastikgehäuse integriert. Beim Blick in eine solche Quelle wird eine virtuelle, „scheinbare“ Quelle wahrgenommen, deren Größe nicht mit der geometrischen übereinstimmt. Zur Bewertung der optischen Strahlungssicherheit ist die Winkelausdehnung der scheinbaren Quelle zu bestimmen.

6.4 Messabstand

Die Lampensicherheitsnorm DIN EN 62471 unterscheidet bezüglich des Messabstandes je nach beabsichtigtem Gebrauch zwischen Lampen, die für die Allgemeinbeleuchtung vorgesehen sind und Lampen für sonstige Anwendungen, inklusive gepulster Lampen. Unter Lampen für die Allgemeinbeleuchtung sind Lampen zur Beleuchtung von Büros, Wohnungen, Straßen, u. ä. zu verstehen. Lampen für sonstige Anwendungen sind z. B. Lampen, die zur Entkeimung, zum Heizen, zur Signalisierung und in industriellen Verfahren verwendet werden.

Für Lampen, die für die Allgemeinbeleuchtung bestimmt sind, soll die Bestrahlungsstärke oder Strahldichte in einem Abstand ermittelt werden, bei dem die Beleuchtungsstärke 500 lx beträgt, wobei dieser Abstand nicht kleiner als 20 cm sein soll¹². Für alle anderen optischen Quellen sollen die Messungen in einer Entfernung von 20 cm zur Quelle durchgeführt werden.

6.5 Messgeräte

Das empfohlene Messgerät zur Beurteilung der photobiologischen Sicherheit von Quellen inkohärenter optischer Strahlung im UV- und sichtbaren Spektralbereich ist der Doppelmonochromator. Die spektrale Bestrahlungsstärke bzw. Strahldichte wird mit Hilfe einer geeigneten Software mit der passenden spektralen Wirkungsfunktion bewertet und über den entsprechenden Wellenlängenbereich integriert, um die gewichtete effektive Bestrahlungsstärke bzw. Strahldichte zu erhalten.

Integrierende Detektoren, bei denen die spektrale Empfindlichkeit einer bestimmten Wirkungsfunktion durch Verwendung von Filtern angepasst ist, können ebenfalls verwendet werden. Allerdings ist die Anpassung an die tatsächliche Wirkungsfunktion nie exakt und führt zu einem gewissen Fehler.

¹² Der Akkommodationsabstand des Auges ist der minimale Abstand, bei dem ein Objekt noch scharf auf der Netzhaut abgebildet werden kann. Die kleinste Entfernung, auf die das Auge noch fokussieren kann, ändert sich mit dem Alter. Kinder können bis auf etwa 7 cm akkommodieren, alte Menschen nur noch auf etwa 1 m. Hier wird der durchschnittliche Akkommodationsabstand von 20 cm genommen.

Für die Beurteilung der photobiologischen Sicherheit von Dauerstrichlampen ist der Doppelmonochromator vorzuziehen. Für LED kann auch ein Einfach-Monochromator ausreichend sein.

Die Eigenschaften des Monochromators, wie die Bandbreite und die Wellenlängengenauigkeit, haben einen großen Einfluss auf das Ergebnis der Beurteilung der photobiologischen Sicherheit. Die in der Lampensicherheitsnorm DIN EN 62471 empfohlenen Bandbreiten und Wellenlängengenauigkeiten sind in den Tabellen 6.5 und 6.6 aufgelistet.

Tab. 6.5 Empfohlene Bandbreiten für Messungen nach der Lampensicherheitsnorm DIN EN 62471

Spektralbereich	Bandbreite/nm
$200 \text{ nm} \leq \lambda < 400 \text{ nm}$	≤ 4
$400 \text{ nm} \leq \lambda < 600 \text{ nm}$	≤ 8
$600 \text{ nm} \leq \lambda < 1\,400 \text{ nm}$	≤ 20
$1\,400 \text{ nm} \leq \lambda$	keine Bandbreiteneinschränkung

Tab. 6.6 Empfohlene Wellenlängengenauigkeit für Messungen nach der Lampensicherheitsnorm DIN EN 62471

Spektralbereich	Wellenlängengenauigkeit/nm
$200 \text{ nm} \leq \lambda < 300 \text{ nm}$	0,2
$300 \text{ nm} \leq \lambda < 325 \text{ nm}$	0,1
$325 \text{ nm} \leq \lambda < 600 \text{ nm}$	0,2
$600 \text{ nm} \leq \lambda \leq 1\,400 \text{ nm}$	2,0

Die empfohlenen Quellen für die Kalibrierung sind die Deuterium-Entladungslampe für den UV-Spektralbereich und die Wolfram- oder Wolfram-Halogen-Lampe für höhere Wellenlängen im UV-, für den sichtbaren und den nahen IR-Spektralbereich.

6.6 Experimenteller Teil

6.6.1 Experimentelle Methoden

Spektrale Bestrahlungsstärke und Strahldichte wurden mittels des Doppelmonochromators DTM 300 von Bentham Instruments gemessen. Der DTM 300 ist ein Gittermonochromator nach dem Czerny-Turner-Aufbau [9], bei dem der Einsatz von sphärischen Spiegeln die Verwendung von Beugungs-Plangittern ermöglicht. Die optische Strahlung einer Quelle tritt durch den Eintrittsspalt und fällt auf den sphärischen Spiegel S_1 (Abbildung 6.7). Da der Eintrittsspalt in der Brennebene von S_1 liegt, wird ein paralleler Strahl erzeugt, mit dem das Beugungsgitter beleuchtet wird. Das Gitter zerlegt durch Beugung diesen Strahl in einzelne Wellenlängen. Ein zweiter sphärischer Spiegel S_2 fokussiert die zerlegte optische Strahlung auf den Austrittsspalt. Die Stellung des Beugungsgitters bestimmt die Wellenlänge, die am Austrittsspalt durchgelassen wird. Um ein Spektrum zu erhalten, wird jede einzelne Wellenlänge durch schrittweises Drehen des Beugungsgitters auf den Austrittsspalt abgebildet. Bei einem Doppelmonochromator, der aus zwei direkt hintereinander montierten Monochromatoren in einem gemeinsamen Gehäuse besteht, wird das störende Streulicht reduziert.

Der Doppelmonochromator DTM 300 wurde hinsichtlich seiner Wellenlängengenauigkeit mittels einer Hg(Ar) Lampe (L.O.T.-Oriol) überprüft. Im Wellenlängenbereich von 250 nm bis 900 nm betrug die Wellenlängengenauigkeit 0,1 nm.

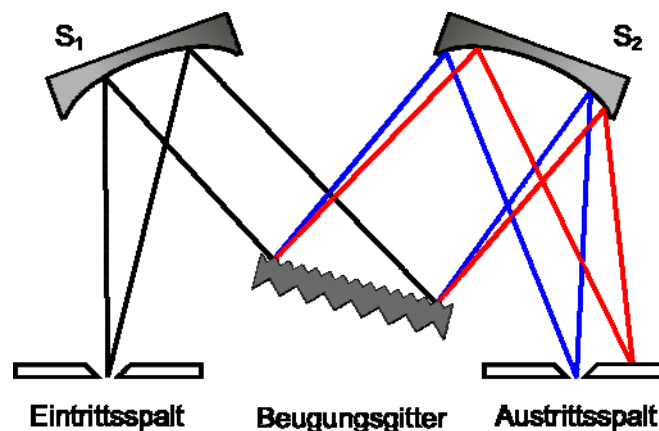


Abb. 6.7 Das Prinzip des Czerny-Turner Monochromators

Vor dem Austrittsspalt des Doppelmonochromators wurde als Detektor ein gekühlter Photomultiplikator (DH-30 TE, Bentham Instruments) eingesetzt. Bei einem Photomultiplikator (PMT von *photomultiplier tube*) [45] wird optische Strahlung in elektrischen Strom (Photostrom) umgesetzt: Die Photonenabsorption führt zur Freisetzung von Elektronen aus der Kathode, die durch den zweiten Pol, die Anode, wieder aufgefangen werden. Die Höhe des Photostromes zwischen Kathode und Anode ist von der optischen Strahlungsleistung abhängig. Hintereinander geschaltete Dynoden erzeugen eine zusätzliche Signalverstärkung. Bei dem angewendeten PMT DH-30 TE wurde die Kathode zusätzlich gekühlt, um eine langwellige spektrale Empfindlichkeit bis 900 nm zu erreichen.

Die Beleuchtungsstärke wurde mit einem Beleuchtungsstärkemessgerät (X11, Gigahertz-Optik) ermittelt. Der Detektor eines Beleuchtungsstärkemessgeräts ist mit einem optischen Filter ausgestattet, der die spektrale Empfindlichkeit des Auges für das photopische Sehen berücksichtigt.

6.6.2 Experimenteller Aufbau für Messungen der Bestrahlungsstärke

Die Abbildung 6.8 zeigt den Versuchsaufbau für die Messungen der spektralen Bestrahlungsstärke. Als Eingangsoptik diente eine Ulbricht-Kugel mit einem Durchmesser von 150 mm (UPK-150, Gigahertz-Optik) und einer 7-mm-Apertur, die das optische Eingangssignal über einen Lichtwellenleiter in den Doppelmonochromator DTM 300 einkoppelte. Der Doppelmonochromator wurde mittels einer 1 000 W-Halogen-Kalibrierlampe (rückführbar auf Normale von der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt) kalibriert. Die Kalibrierung wurde mit einer Bandbreite von 5 nm und einer Schrittweite von 1 nm durchgeführt. Die spektrale Bestrahlungsstärke wurde mit einem PC erfasst, mit Hilfe geeigneter Software (BenWin+ von Bentham Instruments) mit der passenden spektralen Wirkungsfunktion bewertet und über den entsprechenden Wellenlängenbereich integriert.

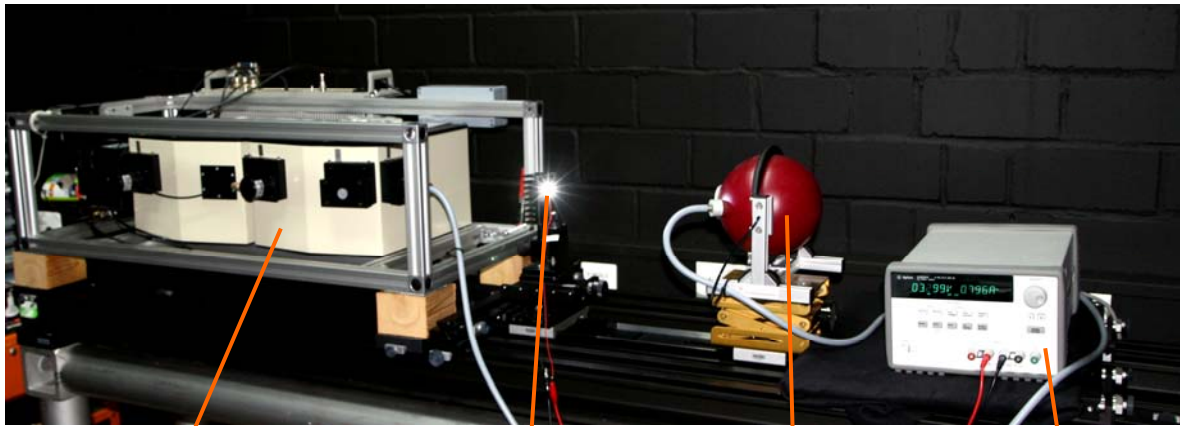
6.6.3 Experimenteller Aufbau für Messungen der Strahldichte

Messungen der spektralen Strahldichte wurden nach der Standardmethode der Lampensicherheitsnorm durchgeführt (siehe Abschnitt 6.2.2.1). In Abbildung 6.9 ist der Versuchsaufbau für die spektralen Strahldichtemessungen dargestellt.

Für Messungen der spektralen Strahldichte wurde der Doppelmonochromator DTM 300 mit einem 50 W Quarzhalogen-Kalibrierlampensystem (Strahldichtenormal SRS8, Bentham Instruments) mit einer Bandbreite von 5 nm und einer Schrittweite von 1 nm kalibriert. Die Messungen wurden mit einer 7-mm-Blende vor der Eingangsoptik durchgeführt. Die vorgeschriebenen Empfangswinkel γ von 1,7 mrad, 11 mrad und 100 mrad wurden mit einem Teleskop (TEL 301, Bentham Instruments) realisiert. Um den Messwert der effektiven Strahldichte zu ermitteln, wurden, wie bei den Messungen der Bestrahlungsstärke, die Spektren mit einem PC erfasst, mit Hilfe geeigneter Software (BenWin+ von Bentham Instruments) mit der passenden spektralen Wirkungsfunktion bewertet und über den entsprechenden Wellenlängenbereich integriert.

6.6.4 Messungen der Beleuchtungsstärke

Die Beleuchtungsstärke wurde mit einem Beleuchtungsstärkemessgerät (X11, Gigahertz-Optik) ermittelt. Messungen wurden mit einer 7-mm-Blende vor dem Beleuchtungsstärkemessgerät durchgeführt.

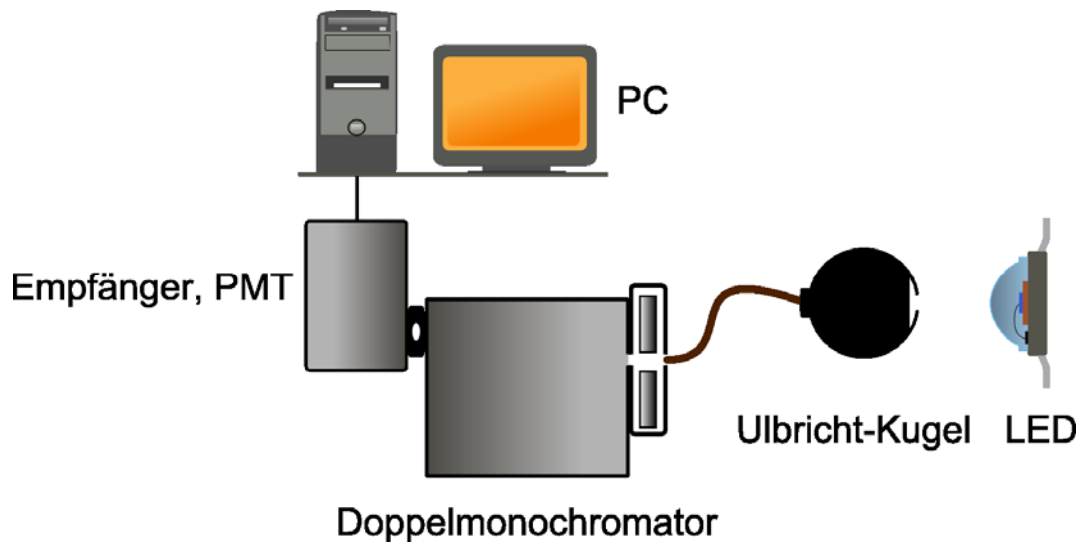


Doppelmonochromator

LED

Ulbricht-Kugel

Stromquelle



Empfänger, PMT

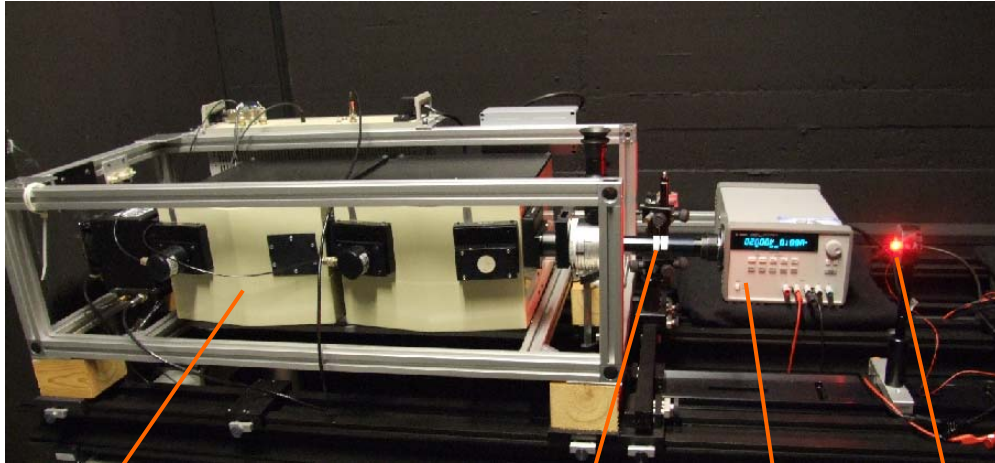
PC

Ulbricht-Kugel

LED

Doppelmonochromator

Abb. 6.8 Versuchsaufbau für die Bestrahlungsstärkemessungen



Doppelmonochromator

Teleskop

Stromquelle

LED

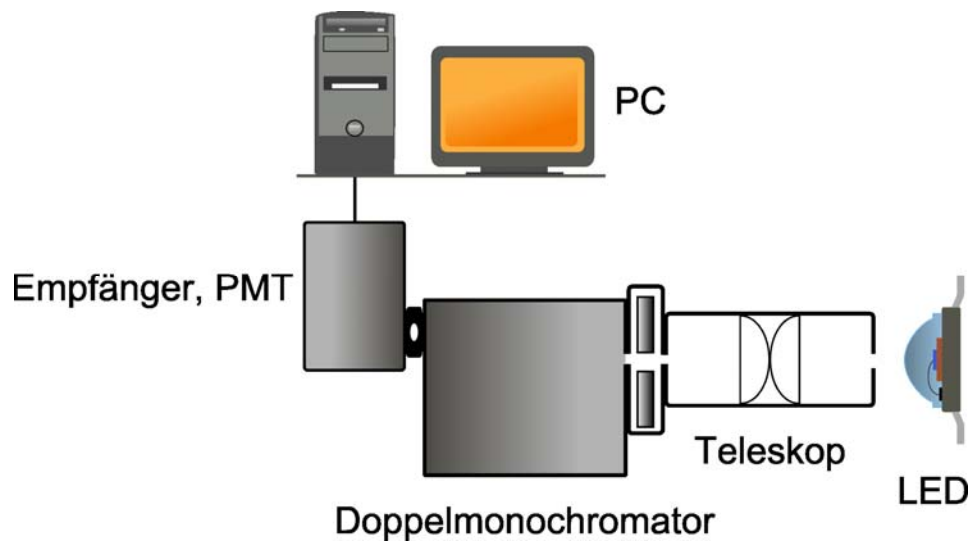


Abb. 6.9 Versuchsaufbau für die Strahldichtemessungen

6.6.5 Experimenteller Aufbau für Messungen der Quellengröße

Die Größe der scheinbaren Quelle wurde nach der Vorgabe der Lampensicherheitsnorm aus den 50%-Punkten des Intensitätsprofils unter Verwendung eines Kamerasystems (Abbildung 6.10) ermittelt. Diese Messungen sind ausführlich im Anhang A dieses Berichtes beschrieben [35].

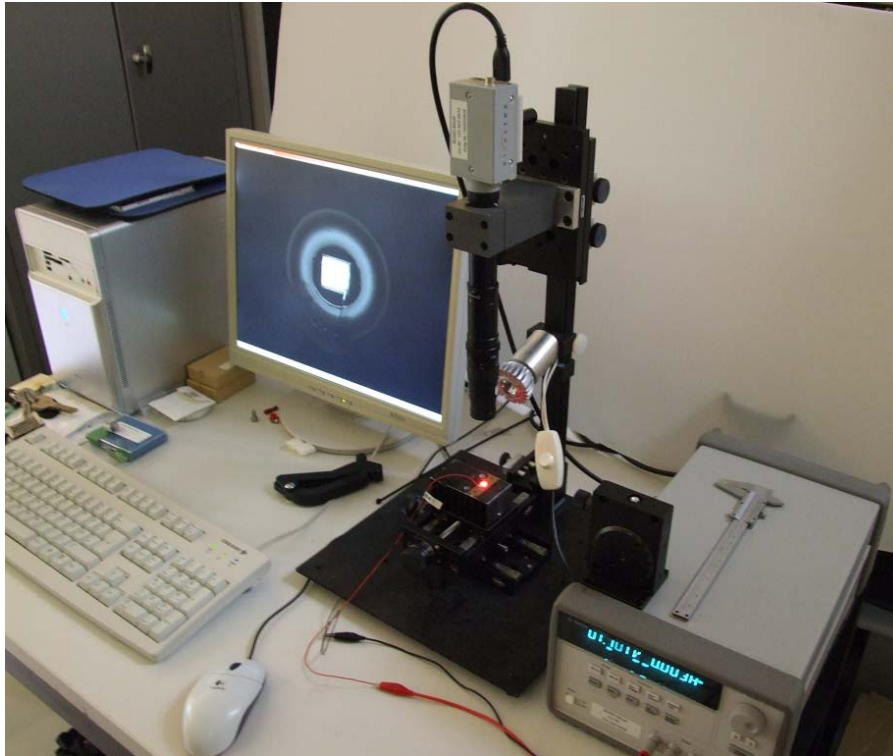


Abb. 6.10 Messaufbau für die Messungen der Quellengröße

6.6.6 Messbedingungen

Die Messungen der spektralen Bestrahlungsstärke und Strahldichte wurden in einem Dunkelraum bei konstanter Umgebungstemperatur von 22°C durchgeführt. Die LED wurden auf einen Kühlkörper unter Verwendung eines wärmeleitenden Klebers aufgebracht und dadurch passiv gekühlt. Sie wurden mit einer Konstantstromquelle (E 3632 A, Agilent), entsprechend den Vorgaben in den technischen Daten, betrieben. Die Messungen wurden erst gestartet, nachdem sich die Stromstärke und die Spannung stabilisiert hatten (etwa 15 Minuten nach dem Anschließen).

Alle Messungen wurden in einer Entfernung von 20 cm durchgeführt und stellen damit ein *worst case*-Szenario dar. Der Abstand wurde von der „Spitze“ (Front) der LED bis zur Messblende gemessen.

7 Ergebnisse

In diesem Kapitel wird die Beurteilung der photochemischen Sicherheit einiger LED dargestellt, die optische Strahlung in unterschiedlichen Spektralbereichen emittieren (im sichtbaren, UV-, bzw. im IR-Spektralbereich). Die Ergebnisse der Beurteilung weiterer LED-Quellen, die Strahlung im sichtbaren Spektralbereich emittieren (Einzel-LED, LED-Taschenlampen, LED-Lampen, ein LED-Reflektor), sind im Anhang B des Berichts zu finden. Alle Messungen wurden in einem Abstand von 20 cm durchgeführt. Fett gedruckte Messwerte in den Tabellen bedeuten eine Überschreitung der Emissionsgrenzwerte der Lampensicherheitsnorm DIN EN 62471.

7.1 LED im sichtbaren Spektralbereich

Wenn eine im sichtbaren Spektralbereich emittierende Strahlungsquelle eine Leuchtdichte unterhalb von $10\,000\text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$ aufweist, kann laut Lampensicherheitsnorm davon ausgegangen werden, dass die Expositionsgrenzwerte nicht überschritten werden¹³. Dieser Leuchtdichtewert wurde bei allen in diesem Bericht aufgeführten LED-Quellen im sichtbaren Spektralbereich überschritten.

Eine LED ist im Hinblick auf zwei Gefährdungen für das Auge zu überprüfen: die photochemische und die thermische Netzhautgefährdung (siehe Tabelle 5.1). Die Einstufung in eine Risikogruppe nach der Lampensicherheitsnorm DIN EN 62471 beruht auf der Messung der spektralen Strahldichte $L(\lambda)$ oder der spektralen Bestrahlungsstärke $E(\lambda)$, sowie der Quellengröße. Im Folgenden wird das Vorgehen bei der Beurteilung der photobiologischen Gefährdung jeweils einer Weiß-, Blau- und Rotlicht emittierenden LED dargestellt.

¹³ WEBER et al. [69] berichten allerdings über Quellen (eine Blaulicht emittierende LED), die eine Leuchtdichte unterhalb $10\,000\text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$ aufweisen und trotzdem den Expositionsgrenzwert für photochemische Netzhautgefährdung für Dauerbestrahlung (Betrachtungsdauer $> 10\,000\text{ s}$) von $L_B = 100\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\text{ sr}^{-1}$ überschreiten.

7.1.1 Weißlicht emittierende LED HP 803 NW (Roithner)

Die Abbildung 7.1 zeigt eine LED des Typs HP 803 NW der Firma Roithner Lasertechnik. Die Farbtemperatur dieser Weißlicht emittierenden LED beträgt 6 000 K. Die LED wurde mit einer Stromstärke von 0,7 A betrieben. Im Abstand von 20 cm wurde eine Beleuchtungsstärke E_v von 471 lx gemessen.



Abb. 7.1 Eine LED des Typs HP 803 NW (Roithner)

7.1.1.1 Bestimmung der Risikogruppe bezüglich der photochemischen und der thermischen Netzhautgefährdung - Standardmethode

Die Winkelausdehnung α wurde aus der gemessenen Größe der scheinbaren Quelle $d = 2,0$ mm (Abbildung 7.2) anhand der Formel (4.1) berechnet:

$$\alpha = \frac{2 \text{ mm}}{200 \text{ mm}} = 0,010 \text{ rad} = 10 \text{ mrad}$$

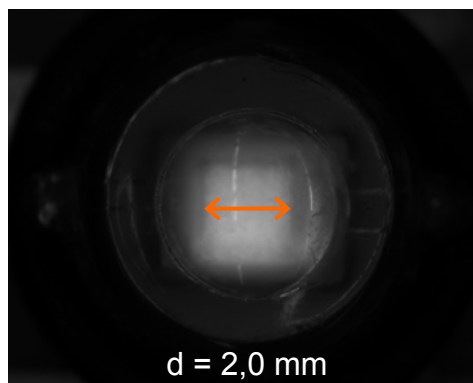


Abb. 7.2 LED HP 803 NW - scheinbare Quelle

Diese Winkelausdehnung wurde zur Bestimmung der Emissionsgrenzwerte für die thermische Netzhautgefährdung nach Tabelle 6.2 eingesetzt:

$$L_{R'} = \frac{28\,000\,000}{10} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} = 2\,800\,000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$$

Freie Gruppe und
Risikogruppe 1

$$L_{R'} = \frac{71\,000\,000}{10} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} = 7\,100\,000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$$

Risikogruppe 2

Die spektrale Strahlendichte $L(\lambda)$ der LED HP 803 NW, gemessen mithilfe der Standardmethode (Abschnitt 6.2.2.1) mit den vorgeschriebenen Empfangswinkeln γ von 1,7 mrad, 11 mrad und 100 mrad, wird in Abbildung 7.3 dargestellt¹⁴. Um die effektive Strahlendichte zu ermitteln, wurde die spektrale Strahlendichte $L(\lambda)$ mit den passenden spektralen Wirkungsfunktionen, $B(\lambda)$ für photochemische Netzhautgefährdung oder $R(\lambda)$ für thermische Netzhautgefährdung, bewertet. Abbildung 7.4 zeigt beispielhaft die mit der spektralen Wirkungsfunktion $B(\lambda)$ bewertete spektrale Strahlendichte $L(\lambda)$ für alle drei Empfangswinkel. Die bewertete spektrale Strahlendichte wurde über den entsprechenden Wellenlängenbereich integriert (Formeln (5.11) und (5.19)), um die Messwerte der effektiven Strahlendichte $(L_B)_{\text{mess}}$ für die photochemische und $(L_R)_{\text{mess}}$ für die thermische Netzhautgefährdung zu ermitteln.

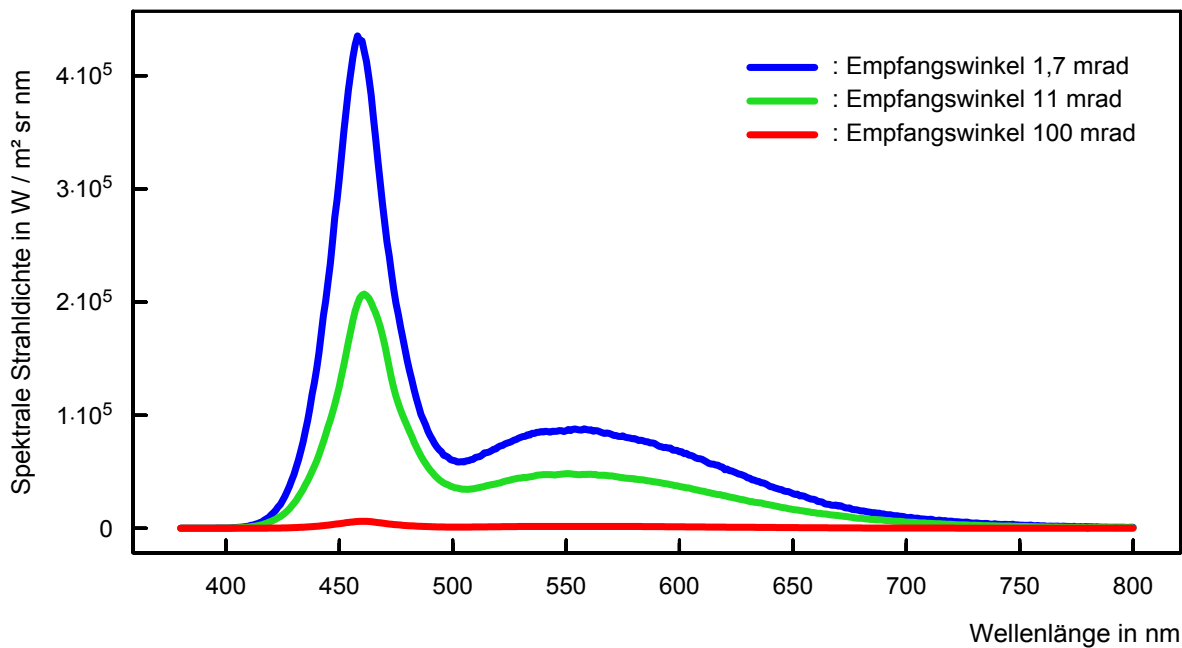


Abb. 7.3 Spektrale Strahlendichte $L(\lambda)$ der LED HP 803 NW, gemessen mit den vorgeschriebenen Empfangswinkeln γ von 1,7 mrad, 11 mrad und 100 mrad

¹⁴ Im weiteren Verlauf des Berichts wird die Darstellung der relativen spektralen Strahlendichte bevorzugt.

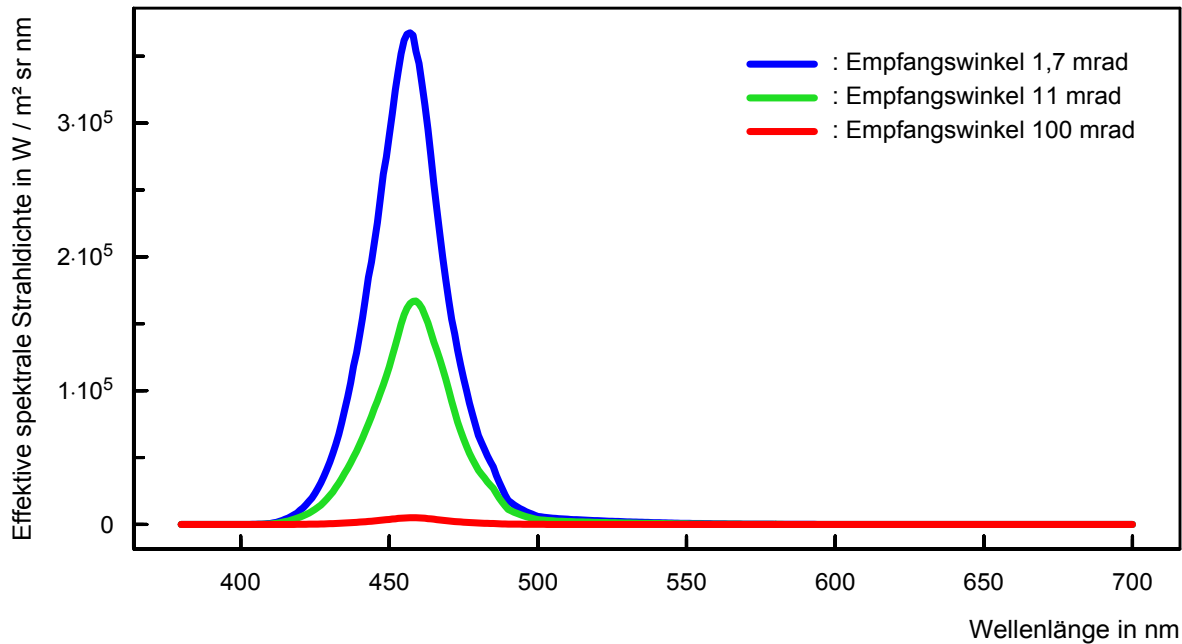


Abb. 7.4 Effektive spektrale Strahldichte der LED HP 803 NW - spektrale Strahldichte $L(\lambda)$, bewertet mit der spektralen Wirkungsfunktion für die photochemische Netzhautgefährdung $B(\lambda)$

Diese Messwerte wurden mit den entsprechenden Emissionsgrenzwerten für die effektive Strahldichte L_B' aus der Tabelle 6.2 und den oben errechneten Emissionsgrenzwerten für die thermische Netzhautgefährdung L_R' verglichen (Tabelle 7.1). Keiner der Emissionsgrenzwerte für die thermische Netzhautgefährdung wurde überschritten. Hinsichtlich der photochemischen Netzhautgefährdung kam es zu einer Überschreitung des Emissionsgrenzwerts der Freien Gruppe. Folglich wurde die LED HP 803 NW in die Risikogruppe 1 eingestuft.

Die maximal zulässige Expositionsdauer t_{\max} bei direktem Blick in die LED HP 803 NW kann anhand der Formel (5.14) berechnet werden. Dabei ist für die effektive Strahldichte der Messwert $(L_B)_{\text{mess}}$ einzusetzen, der der Risikogruppe entspricht, in die die LED eingruppiert wird ($(L_B)_{\text{mess}} = 5\,354 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$):

$$t_{\max} = \frac{10^6}{5\,354} \text{ s} = 187 \text{ s}$$

Tab. 7.1 Messwerte der effektiven Strahldichte $(L_B)_{\text{mess}}$ für die photochemische und $(L_R)_{\text{mess}}$ für die thermische Netzhautgefährdung der LED HP 803 NW sowie die dazugehörigen Emissionsgrenzwerte nach der Lampensicherheitsnorm

Gefährdung	Effektive Strahldichte/ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$	Freie Gruppe	Risiko- gruppe 1	Risiko- gruppe 2
Netzhaut photochemisch	Messwert $(L_B)_{\text{mess}}$	158	5 354	11 132
	Emissionsgrenzwert L_B'	100	10 000	4 000 000
Netzhaut thermisch	Messwert $(L_R)_{\text{mess}}$	13 784	13 784	26 259
	Emissionsgrenzwert L_R'	2 800 000	2 800 000	7 100 000

Anmerkung: Da die LED HP 803 NW eine Winkelausdehnung α von 10 mrad besitzt, ist nur die mit dem Empfangswinkel $\gamma = 1,7$ mrad gemessene Strahldichte die tatsächliche physikalische Strahldichte dieser Quelle. Messungen mit Empfangswinkeln, die größer als 10 mrad sind (11 mrad und 100 mrad), ergeben hier eine gemittelte Strahldichte. Bei einer Quelle, die einen Winkel größer als 100 mrad aufspannt, wären die Messergebnisse unabhängig vom angewandten Empfangswinkel γ (vgl. auch Abschnitt 6.2.1).

7.1.1.2 Bestimmung der Risikogruppe bezüglich der photochemischen Netzhautgefährdung - kleine Quelle (alternative Methode)

Da die LED HP 803 NW im Messabstand von 20 cm eine Winkelausdehnung α kleiner als 11 mrad hat, lässt sie sich als kleine Quelle betrachten. Deshalb kann die Bestimmung der Risikogruppe bezüglich der photochemischen Netzhautgefährdung anhand des alternativen Messverfahrens durchgeführt werden (siehe Abschnitte 5.2.1.4 und 6.2.2.2).

Die spektrale Bestrahlungsstärke wurde mit vorgeschriebenen Empfangswinkeln $\gamma = 11$ mrad (Risikogruppen 1 und 2) und $\gamma = 100$ mrad (Freie Gruppe) gemessen. Die Abbildung 7.5 zeigt die spektrale Bestrahlungsstärke¹⁵ $E(\lambda)$ der LED HP 803 NW gemessen mit $\gamma = 100$ mrad. Um die Messwerte der effektiven Bestrahlungsstärke $(E_B)_{\text{mess}}$ für die photochemische Netzhautgefährdung zu ermitteln, wurde die spektrale Bestrahlungsstärke $E(\lambda)$ mit der spektralen Wirkungsfunktion für die photochemische Netzhautgefährdung $B(\lambda)$ bewertet und über den entsprechenden Wellenlängenbereich integriert (Formel (5.15)). Die Messwerte wurden mit den entsprechenden Emissionsgrenzwerten für die effektive Bestrahlungsstärke E_B' aus der Tabelle 6.2 verglichen (Tabelle 7.2).

¹⁵ Bei weiteren LED wird die Darstellung der relativen spektralen Bestrahlungsstärke bevorzugt.

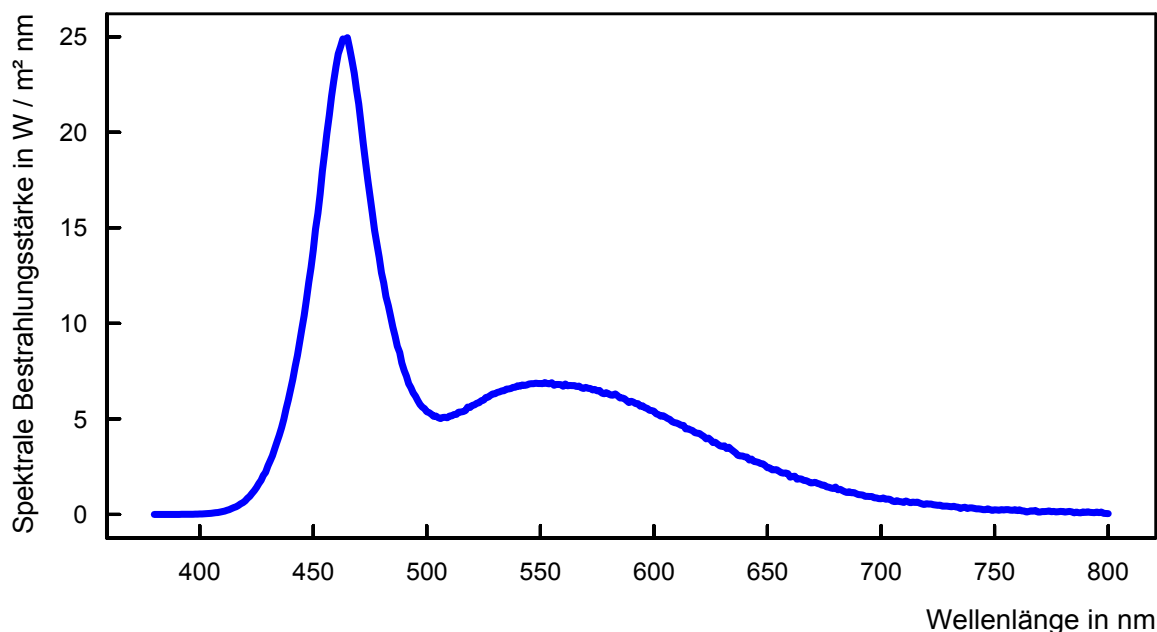


Abb. 7.5 Spektrale Bestrahlungsstärke der LED HP 803 NW

Tab. 7.2 Messwerte der effektiven Bestrahlungsstärke (E_B)_{mess} für die photochemische Netzhautgefährdung der LED HP 803 NW sowie die dazugehörigen Emissionsgrenzwerte nach der Lampensicherheitsnorm

Gefährdung	Effektive Bestrahlungsstärke/ $W \cdot m^{-2}$	Freie Gruppe	Risiko- gruppe 1	Risiko- gruppe 2
Netzhaut photochemisch - kleine Quelle	Messwert (E_B) _{mess}	0,42	0,35	
	Emissionsgrenzwert E_B'	1	1	400

Keiner der Emissionsgrenzwerte für die photochemische Netzhautgefährdung wurde überschritten. Folglich könnte die LED HP 803 NW in die Freie Gruppe eingestuft werden. Dieses Ergebnis stimmt jedoch nicht mit dem Ergebnis der Standardmethode überein, wonach die LED HP 803 NW in die Risikogruppe 1 eingestuft wurde: Die alternative Methode soll nur dann angewendet werden, wenn die kreisförmige Feldblende, die zur Realisierung des Empfangswinkels γ dient, nahe genug an der Quelle platziert werden kann, was bei LED mit Linsen meist problematisch ist.

Alle weiteren LED-Quellen im sichtbaren Spektralbereich wurden anhand der durch die Standardmethode gewonnenen Messwerte in eine Risikogruppe eingestuft.

7.1.2 Blaulicht emittierende LED LD W5AP (OSRAM)

Die LED LD W5AP (Abbildung 7.6) ist eine LED des Typs Diamond Dragon der Firma OSRAM Opto Semiconductors. Diese Blaulicht emittierende LED wurde mit einer Stromstärke von 1,4 A betrieben. Die Beleuchtungsstärke E_v im Abstand von 20 cm beträgt 361 lx.



Abb. 7.6 LED LD W5AP des Typs Diamond Dragon (OSRAM)

7.1.2.1 Bestimmung der Risikogruppe bezüglich der photochemischen und der thermischen Netzhautgefährdung

Die Winkelausdehnung α der scheinbaren Quelle wurde mittels der gemessenen Quellengröße von $d = 2,3 \text{ mm}$ (Abbildung 7.7) berechnet:

$$\alpha = \frac{2,3 \text{ mm}}{200 \text{ mm}} = 11,5 \text{ mrad}$$

Anhand dieser Winkelausdehnung wurden die Emissionsgrenzwerte L_R' für die thermische Netzhautgefährdung berechnet.

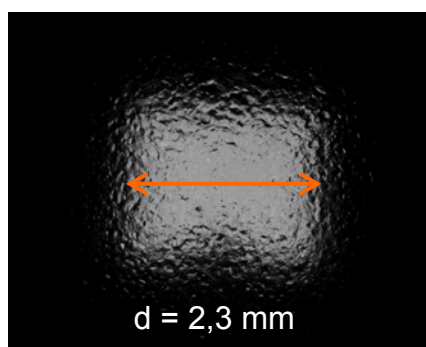


Abb. 7.7 LED LD W5AP - scheinbare Quelle

Die Abbildung 7.8 zeigt die relative spektrale Strahldichte $L(\lambda)$ der LED LD W5AP. Die Messwerte der effektiven Strahldichte $(L_B)_{\text{mess}}$ für die photochemische und $(L_R)_{\text{mess}}$ für die thermische Netzhautgefährdung sowie die entsprechende Emissions-

grenzwerte der Risikogruppen L_B' und L_R' sind in Tabelle 7.3 aufgelistet. Keiner der Emissionsgrenzwerte für die thermische Netzhautgefährdung wurde überschritten. Hinsichtlich der photochemischen Netzhautgefährdung kam es zu einer Überschreitung der Emissionsgrenzwerte der Freien Gruppe und der Risikogruppe 1 und die LED LD W5AP wurde in die Risikogruppe 2 eingestuft. Die maximal zulässige Expositionsdauer t_{\max} bei direktem Blick in die LED LD W5AP beträgt:

$$t_{\max} = \frac{10^6}{100\,300} \text{ s} = 10 \text{ s}$$

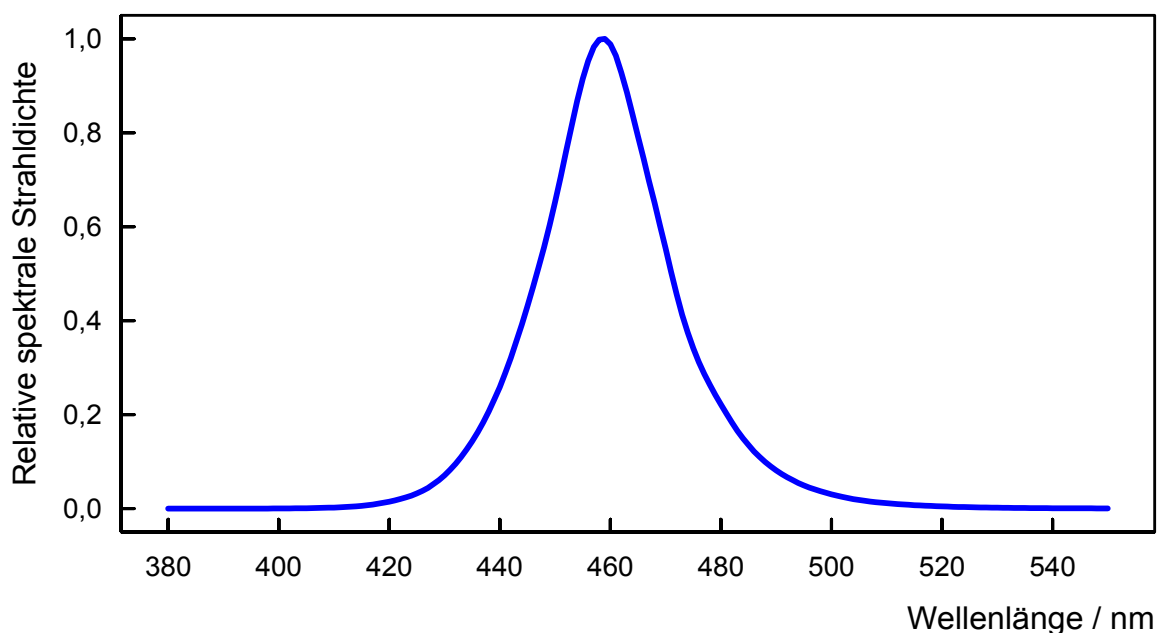


Abb. 7.8 Relative spektrale Strahlendichte der LED LD W5AP

Tab. 7.3 Messwerte der effektiven Strahlendichte $(L_B)_{\text{mess}}$ für die photochemische und $(L_R)_{\text{mess}}$ für die thermische Netzhautgefährdung der LED LD W5AP sowie die dazugehörigen Emissionsgrenzwerte nach der Lampensicherheitsnorm

Gefährdung	Effektive Strahlendichte/ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$	Freie Gruppe	Risiko- gruppe 1	Risiko- gruppe 2
Netzhaut photochemisch	Messwert $(L_B)_{\text{mess}}$	1 249	50 608	100 300
	Emissionsgrenzwert L_B'	100	10 000	4 000 000
Netzhaut thermisch	Messwert $(L_R)_{\text{mess}}$	65 891	65 891	126 058
	Emissionsgrenzwert L_R'	2 434 783	2 434 783	6 173 913

7.1.3 Rotlicht emittierende LED ELS (Roithner)

Abbildung 7.9 zeigt eine LED des Typs ELS der Firma Roithner Lasertechnik. Diese LED wurde mit einer Stromstärke von 0,35 A betrieben. Die Beleuchtungsstärke E_v im Abstand von 20 cm beträgt 3 034 lx.



Abb. 7.9 Eine LED des Typs ELS (Roithner)

7.1.3.1 Bestimmung der Risikogruppe bezüglich der photochemischen und der thermischen Netzhautgefährdung

Die Winkelausdehnung α wurde aus der gemessenen Größe der scheinbaren Quelle von $d = 6,1$ mm (Abbildung 7.10) errechnet:

$$\alpha = \frac{6,1 \text{ mm}}{200 \text{ mm}} = 30,5 \text{ mrad}$$

Anhand dieser Winkelausdehnung wurden die Emissionsgrenzwerte L_R' für die thermische Netzhautgefährdung berechnet (Tabelle 7.4).

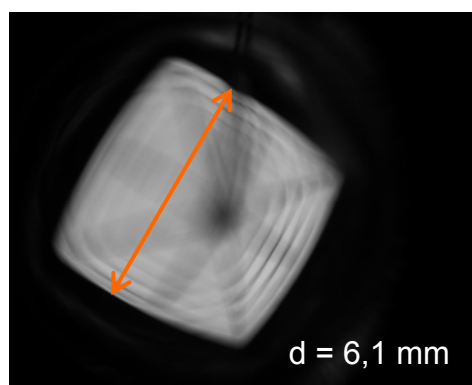


Abb. 7.10 LED ELS rot - scheinbare Quelle

Abbildung 7.11 zeigt die relative spektrale Strahldichte $L(\lambda)$ der Rotlicht emittierenden LED ELS. Die Messwerte der effektiven Strahldichte $(L_B)_{\text{mess}}$ für die photochemische und $(L_R)_{\text{mess}}$ für die thermische Netzhautgefährdung sowie die entsprechenden Emissionsgrenzwerte der Risikogruppen L_B' und L_R' sind in der Tabelle 7.4 aufgelistet. Keiner der Emissionsgrenzwerte für die thermische und die photochemische Netz-

hautgefährdung wurde überschritten. Die Rotlicht emittierende LED ELS wurde in die Freie Gruppe eingestuft.

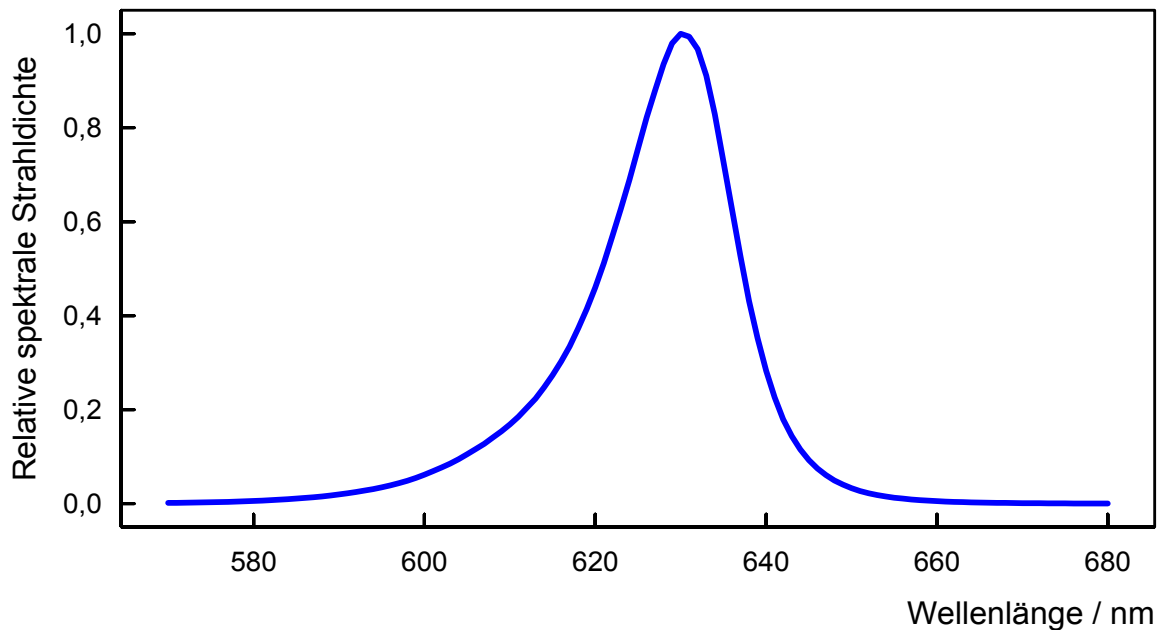


Abb. 7.11 Relative spektrale Strahlidichte der LED ELS rot

Tab. 7.4 Messwerte der effektiven Strahlidichte $(L_B)_{\text{mess}}$ für die photochemische und $(L_R)_{\text{mess}}$ für die thermische Netzhautgefährdung der Rotlicht emittierenden LED ELS und die dazugehörigen Emissionsgrenzwerte nach der Lampensicherheitsnorm

Gefährdung	Effektive Strahlidichte/ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$	Freie Gruppe	Risiko- gruppe 1	Risiko- gruppe 2
Netzhaut photochemisch	Messwert $(L_B)_{\text{mess}}$	0	1	1
	Emissionsgrenzwert L_B	100	10 000	4 000 000
Netzhaut thermisch	Messwert $(L_R)_{\text{mess}}$	22 464	22 464	24 361
	Emissionsgrenzwert L_R	918 033	918 033	2 327 869

7.2 LED im UV-Spektralbereich: UV-LED 365 (Seoul)

Eine LED, die optische Strahlung im UV-Spektralbereich emittiert, ist entsprechend der emittierten Wellenlängen im Hinblick auf eine oder mehrere Gefährdungen zu überprüfen: die aktinische UV-Gefährdung, die UV-A-Gefährdung der Augen und die photochemische Netzhautgefährdung (siehe Tabelle 5.1). Die Einstufung in eine Risikogruppe nach der Lampensicherheitsnorm DIN EN 62471 beruht auf den Messungen der spektralen Bestrahlungsstärke $B(\lambda)$ und der spektralen Strahldichte $L(\lambda)$.

Die UV-LED 365 der Firma Seoul Semiconductor (Abbildung 7.12) wurde mit einer Stromstärke von 0,03 A betrieben.



Abb. 7.12 UV-LED 365 (Seoul); Quelle: Technical Data Sheet, Seoul Semiconductor

7.2.1 Bestimmung der Risikogruppe bezüglich der aktinischen UV-Gefährdung

Die Abbildung 7.13 zeigt die relative spektrale Bestrahlungsstärke $E(\lambda)$ der UV-LED 365. Um den Messwert der effektiven Bestrahlungsstärke $(E_S)_{\text{mess}}$ für aktinische UV-Gefährdung zu ermitteln, wurde die spektrale Bestrahlungsstärke $E(\lambda)$ mit der spektralen Wirkungsfunktion $S(\lambda)$ für aktinische UV-Gefährdung bewertet und über den entsprechenden Wellenlängenbereich integriert (Formel (5.3)). Dieser Messwert wurde mit den Emissionsgrenzwerten E_S' für die aktinische UV-Gefährdung aus Tabelle 6.2 verglichen. Keiner der Emissionsgrenzwerte wurde überschritten (siehe Tabelle 7.5) und die UV-LED 365 wurde bezüglich der aktinischen UV-Gefährdung in die Freie Gruppe eingeordnet.

7.2.2 Bestimmung der Risikogruppe bezüglich der UV-A-Gefährdung der Augen

Um den Messwert der Bestrahlungsstärke $(E_{\text{UVA}})_{\text{mess}}$ für die UV-A-Gefährdung der Augen zu ermitteln, wurde die unbewertete spektrale Bestrahlungsstärke $E(\lambda)$ der UV-LED 365 über den entsprechenden Wellenlängenbereich integriert (Formel (5.8)). Ein Vergleich dieses Messwertes mit den Emissionsgrenzwerten für die UV-A-Gefährdung zeigt, dass keiner der Emissionsgrenzwerte überschritten wird (Tabelle 7.5). Die UV-LED 365 kann bezüglich der UV-A-Gefährdung der Augen ebenfalls der Freien Gruppe zugeordnet werden.

7.2.3 Bestimmung der Risikogruppe bezüglich der photochemischen Netzhautgefährdung

Die spektrale Strahldichte $L(\lambda)$ der UV-LED 365 wurde mit vorgeschriebenen Empfangswinkeln γ von 1,7 mrad, 11 mrad und 100 mrad gemessen, mit der spektralen Wirkungsfunktion für die photochemische Netzhautgefährdung $B(\lambda)$ bewertet und über den entsprechenden Wellenlängenbereich integriert. Keiner der Messwerte der effektiven Strahldichte $(L_B)_{\text{mess}}$ für die photochemische Netzhautgefährdung überschreitet die entsprechenden Emissionsgrenzwerte der effektiven Strahldichte L_B' . Die UV-LED 365 ist daher auch bezüglich der photochemischen Netzhautgefährdung der Freien Gruppe zuzuordnen.

In Tabelle 7.5 sind zusammenfassend die Ergebnisse der Bewertung der photobiologischen Sicherheit der UV-LED 365 dargestellt. Die UV-LED 365 wurde in die Freie Gruppe eingestuft.

Eine Gefährdungsbeurteilung nach der OStrV würde hier zu einem anderen Ergebnis kommen. Während die Lampensicherheitsnorm für die Freie Gruppe von einer Zeitbasis von 1 000 s ausgeht, wird in der OStrV ein Arbeitstag von 30 000 s zu Grunde gelegt. Dies würde einen Emissionsgrenzwert für die Gefährdung der Augen im UV-A-Spektralbereich von $E_{\text{UVA}}' = 0,33 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, statt $10 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, ergeben. Der Messwert $(E_{\text{UVA}})_{\text{mess}}$ von $0,7 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ liegt somit oberhalb des Expositionsgrenzwertes.

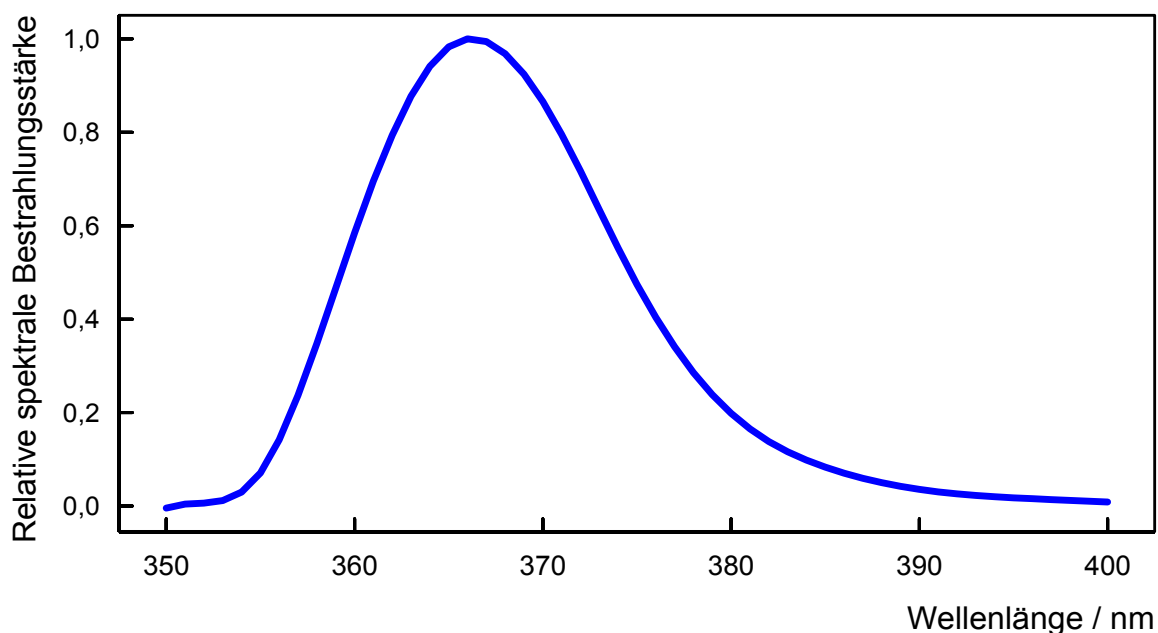


Abb. 7.13 Relative spektrale Bestrahlungsstärke der UV-LED 365

Tab. 7.5 Messwerte der effektiven Bestrahlungsstärke $(E_S)_{\text{mess}}$ für die aktinische UV-Gefährdung, der Bestrahlungsstärke $(E_{\text{UVA}})_{\text{mess}}$ für die UV-A-Gefährdung der Augen und der effektiven Strahldichte $(L_B)_{\text{mess}}$ für die photochemische Netzhautgefährdung der UV-LED 365 mit den dazugehörigen Emissionsgrenzwerten nach der Lampensicherheitsnorm

Gefährdung	Strahldichte/ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$ Bestrahlungsstärke/ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$	Freie Gruppe	Risiko- gruppe 1	Risiko- gruppe 2
Aktinische UV- Gefährdung der Augen	Messwert $(E_S)_{\text{mess}}$	0,00007		
	Emissionsgrenzwert E_S'	0,001	0,003	0,030
Gefährdung der Augen im UV-A- Spektralbereich	Messwert $(E_{\text{UVA}})_{\text{mess}}$	0,7		
	Emissionsgrenzwert E_{UVA}'	10	33	100
Netzhaut photochemisch	Messwert $(L_B)_{\text{mess}}$	0,04	1,0	1,9
	Emissionsgrenzwert L_B'	100	10 000	4 000 000

7.3 LED im IR-Spektralbereich: IR-LED SFH 4230 (OSRAM)

Eine LED, die optische Strahlung im IR-Spektralbereich emittiert, ist entsprechend der emittierten Wellenlängen im Hinblick auf eine oder mehrere Gefährdungen zu überprüfen: die thermische Netzhautgefährdung, die thermische Netzhautgefährdung - schwacher visueller Reiz und die IR-Gefährdung der Augen (siehe Tabelle 5.1). Die Einstufung in eine Risikogruppe beruht je nach Art der Gefährdung auf den Messungen der spektralen Bestrahlungsstärke $B(\lambda)$ und/oder der spektralen Strahldichte $L(\lambda)$ sowie der Quellengröße.

Die IR-LED SFH 4230 der Firma OSRAM (Abbildung 7.14) wurde mit einer Stromstärke von 0,35 A betrieben.

7.3.1 Bestimmung der Risikogruppe bezüglich der thermischen Netzhautgefährdung - schwacher visueller Reiz

Die Leuchtdichte der IR-LED SFH 4230 gemittelt über ein kreisförmiges Sichtfeld, das einen Empfangswinkel γ von 11 mrad aufspannt, beträgt $3,4 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$ und ist damit kleiner als $10 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$. Deshalb darf für eine Expositionsdauer länger als 10 s der Emissionsgrenzwert für thermische Netzhautgefährdung (schwacher visueller Reiz) aus der Tabelle 6.2 nicht überschritten werden (Abschnitt 5.2.1.6).



Abb. 7.14 IR-LED SFH 4230 (OSRAM)

Die Winkelausdehnung α wurde aus der gemessenen Quellengröße von $d = 1,0$ mm (Abbildung 7.15) errechnet und beträgt $\alpha = 5,0$ mrad. Anhand dieser Winkelausdehnung wurde der Emissionsgrenzwert der effektiven Strahldichte L_{IR}' für die thermische Netzhautgefährdung (schwacher visueller Reiz) mit Hilfe der Formeln (5.26) und (5.28) berechnet (Tabelle 7.6).

Die Abbildung 7.16 zeigt die relative spektrale Strahldichte der IR-LED SFH 4230. Die mit der spektralen Wirkungsfunktion $R(\lambda)$ für thermische Netzhautgefährdung bewertete spektrale Strahldichte wurde über den entsprechenden Wellenlängenbereich integriert (Formel (5.24)), um den Messwert der effektiven Strahldichte $(L_{IR})_{mess}$ für thermische Netzhautgefährdung (schwacher visueller Reiz) zu ermitteln. Der Emissionsgrenzwert wurde nicht überschritten (Tabelle 7.6), so dass die IR-LED SFH 4230 bezüglich der thermischen Netzhautgefährdung (schwacher visueller Reiz) der Freien Gruppe zugeordnet werden konnte.

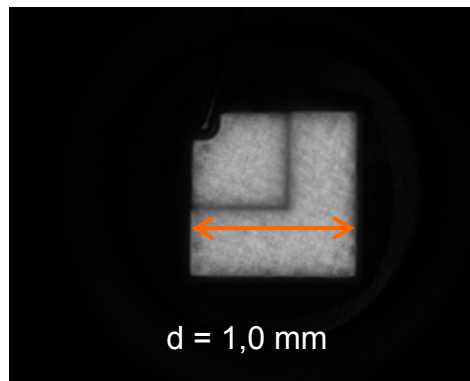


Abb. 7.15 IR-LED SFH 4230 - scheinbare Quelle

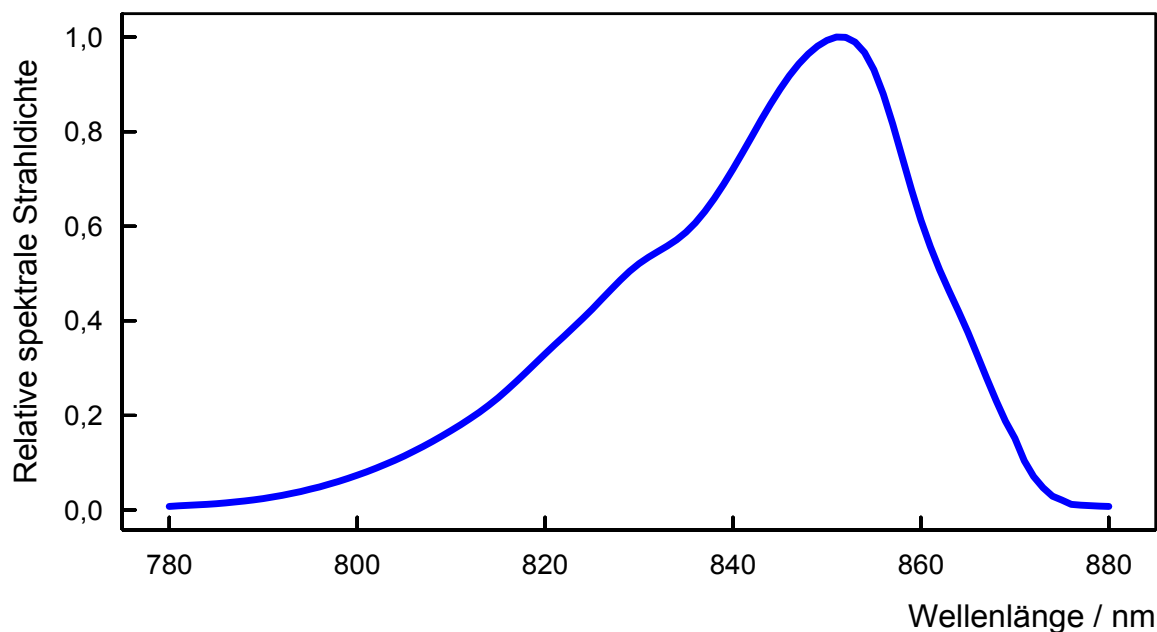


Abb. 7.16 Relative spektrale Strahllichte der IR-LED SFH 4230

7.3.2 Bestimmung der Risikogruppe bezüglich der IR-Gefährdung der Augen

Um den Messwert der Bestrahlungsstärke $(E_{IR})_{mess}$ für die IR-Gefährdung der Augen zu ermitteln, wurde die unbewertete spektrale Bestrahlungsstärke $E(\lambda)$ der IR-LED SFH 4230 über den entsprechenden Wellenlängenbereich integriert (Formel (5.29)). Ein Vergleich des Messwerts $(E_{IR})_{mess}$ mit den Emissionsgrenzwerten für die IR-Gefährdung der Augen zeigt, dass keiner der Emissionsgrenzwerte überschritten wurde (Tabelle 7.6). Die IR-LED SFH 4230 kann daher bezüglich der IR-Gefährdung der Augen ebenfalls der Freien Gruppe zugeordnet werden.

Tab. 7.6 Messwerte der effektiven Strahllichte $(L_{IR})_{mess}$ für die thermische Netzhautgefährdung (schwacher visueller Reiz) und der Bestrahlungsstärke $(E_{IR})_{mess}$ für IR-Gefährdung der Augen der IR-LED SFH 4230 sowie die dazugehörigen Emissionsgrenzwerte nach der Lampensicherheitsnorm

Gefährdung	Effektive Strahllichte/ $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$ Bestrahlungsstärke/ $W \cdot m^{-2}$	Freie Gruppe	Risiko- gruppe 1	Risiko- gruppe 2
Netzhaut thermisch - schwacher visueller Reiz	Messwert $(L_{IR})_{mess}$	12 638		
	Emissionsgrenzwert L_{IR}'	545 455	545 455	545 455
IR-Gefährdung der Augen	Messwert $(E_{IR})_{mess}$	1,6		
	Emissionsgrenzwert E_{IR}'	100	570	3 200

8 Zusammenfassung und Ausblick

Die rasanten Fortschritte in der LED-Technologie der letzten Jahre haben zu leistungsstarken LED geführt. Effizienzrekorde werden immer wieder übertroffen, und es wird davon ausgegangen, dass die Lichtausbeute von LED auch in Zukunft weiter gesteigert werden kann. Angesichts dieser Entwicklung stellt sich zunehmend die Frage nach der photobiologischen Sicherheit von LED. Eine Reihe von Untersuchungen und Stellungnahmen der letzten Jahre haben sich mit unterschiedlichen Aspekten dieser Frage befasst [2, 18, 22, 28, 56, 60, 61, 63]. Die normativen Bestimmungen bezüglich des Messverfahrens für die Bewertung der photobiologischen Sicherheit der LED wurden geändert: Die photobiologische Sicherheit von LED wird seither nach der Lampensicherheitsnorm DIN EN 62471 beurteilt.

Die Norm DIN EN 62471 beschreibt anhand eines Risikogruppen-Klassifizierungssystems ein standardisiertes Verfahren zur Bewertung photobiologischer Gefährdungen, die von Lampen und Lampensystemen ausgehen können. Um die Frage zu beantworten, ob es möglich ist, die vorgeschriebenen Messverfahren zu vereinfachen, wurden nach den Bestimmungen der DIN EN 62471 experimentelle Aufbauten zur Messung der radiometrischen Größen Bestrahlungsstärke und Strahldichte sowie zur Bestimmung der Größe der scheinbaren Quelle realisiert. Im Hinblick auf das Messverfahren wurden im Rahmen des Projektes folgende Ergebnisse erzielt:

- Ein Verfahren zur Messung der scheinbaren Quellengröße wurde entwickelt. Anhand dieses Messverfahrens können künftig außer LED auch andere Quellen inkohärenter optischer Strahlung beurteilt werden.
- Vereinfachungen der Verfahren zur Messung der Bestrahlungsstärke und Strahldichte wurden nicht erzielt.
- Die Beurteilung der photochemischen Netzhautgefährdung für kleine Quellen mithilfe der alternativen Methode kann falsche Ergebnisse liefern. Diese Messmethode soll nur dann angewendet werden, wenn die Feldblende nah genug vor der scheinbaren Quelle positioniert werden kann, um den definierten Empfangswinkel zu erhalten. Bei LED mit vorstehender Linse ist die erforderliche Positionierung der Feldblende nicht möglich.

Im Rahmen des Projektes wurde die photobiologische Sicherheit unterschiedlicher Einzel-LED, LED-Taschenlampen, LED-Lampen und eines LED-Reflektors im sichtbaren Spektralbereich nach den Vorgaben der Lampensicherheitsnorm DIN EN 62471 überprüft (Tabelle 8.1). Zum Zeitpunkt der Erstellung des Berichtes kann Folgendes festgestellt werden:

- Rot- und Gelblicht emittierende LED stellen keine photobiologische Gefährdung dar.
- Bei einem kurzen Blick in eine Weiß- oder Blaulicht emittierende LED werden die Expositionsgrenzwerte nicht überschritten.
- Bei einem langzeitigen, absichtlichen Blick in eine Weiß- oder Blaulicht emittierende LED können die Expositionsgrenzwerte für die photochemische Netzhautgefährdung überschritten werden. Die kürzeste maximale Expositionsdauer t_{\max} , die bei den experimentellen Untersuchungen ermittelt wurde, beträgt 10 s. Diese Zeit

ist einerseits lang genug, um bei einem einmaligen Blick in solche LED eine Abwendungsreaktion hervorzurufen. Allerdings sind, da es sich hier um eine photochemische Gefährdung handelt, alle Einzelexpositionen über einen achtstündigen Arbeitstag hinweg zu berücksichtigen. Bei einem Beschäftigten in der LED-Produktion z. B., kann die Summe der Einzelexpositionen rasch diese Zeit übersteigen.

- Weiß- und Blaulicht emittierende LED erreichen zurzeit maximal die Risikogruppe 2 der Lampensicherheitsnorm (Sicherheit auf Basis von Abwendungsreaktionen) aufgrund der Überschreitung des Emissionsgrenzwertes für die photochemische Netzhautgefährdung.
- Von 23 Weißlicht emittierenden LED wurden vier in die Freie Gruppe, elf in die Risikogruppe 1 und acht in die Risikogruppe 2 eingestuft. Von sechs Blaulicht emittierenden LED wurde eine der Risikogruppe 1 und fünf der Risikogruppe 2 zugeordnet.
- Keiner der Emissionsgrenzwerte für thermische Netzhautschädigung wird bei Weiß- und Blaulicht emittierenden LED überschritten. Bei LED sind derzeit die Leistungen nicht ausreichend, um eine thermische Netzhautschädigung hervorzurufen. Der höchste in diesen experimentellen Untersuchungen ermittelte Messwert für die effektive Strahldichte $(L_R)_{\text{mess}}$ beträgt nur 4 % des entsprechenden Emissionsgrenzwertes.

Bei der Beurteilung der photobiologischen Gefährdung am Arbeitsplatz müssen konkrete Expositionsszenarien (Abstand zur Quelle, Expositionsdauer) berücksichtigt werden. Das Verfahren für die Expositionsermittlung, das die Analyse der Arbeitsaufgabe, die Messung und den Vergleich mit den Expositionsgrenzwerten umfasst, wird in den Normen DIN EN 14255-1 [10] (für UV-Strahlung) und DIN EN 14255-2 [11] (für sichtbare und IR-Strahlung) beschrieben. Das Messverfahren unterscheidet sich dabei nicht von dem der Lampensicherheitsnorm. Der vorliegende Bericht macht deutlich, dass eine derartige Beurteilung sehr aufwendig ist, da mehrere Messverfahren und Expositionsgrenzwerte anzuwenden sind. Herstellerangaben zur Risikogruppenklassifizierung können eine Beurteilung am Arbeitsplatz erleichtern, da sich anhand der Risikogruppe ableiten lässt, wie lange man sich im Referenzabstand aufhalten kann, bevor die Expositionsgrenzwerte überschritten werden.

Dabei sind die konkrete Expositionsdauer und der Abstand zur Quelle wichtig, um beurteilen zu können, ob das *worst case*-Szenario, das sich in der Klassifizierung ausdrückt, auch realisiert wird. In einer realen Expositionssituation (großer Abstand, kurze Expositionsdauer) kann das photobiologische Risiko stark reduziert werden. Das photobiologische Risiko bei Quellen inkohärenter optischer Strahlung, wie LED, nimmt mit dem Abstand stark ab. Folglich könnte auch eine LED einer höheren Risikogruppe bei Einhaltung größerer Abstände gefahrlos verwendet werden (Abbildung 8.1).

Die Messungen der Bestrahlungsstärke und der Strahldichte wurden mithilfe eines Doppelmonochromators durchgeführt. Dieses Messgerät wird in der Lampensicherheitsnorm DIN EN 62471 zur Beurteilung der photobiologischen Sicherheit von Quellen inkohärenter optischer Strahlung im UV- und sichtbaren Spektralbereich empfohlen. Ein Doppelmonochromator ist ein teures Messgerät, das überwiegend in Labor-

untersuchungen eingesetzt wird. Für Arbeitsplatzmessungen sind integrierende Detektoren geeigneter. Allerdings ist die Anpassung an die tatsächliche Wirkungsfunktion nie exakt und führt zu einem gewissen Fehler. Ein Vergleich mit den Ergebnissen eines integrierenden Detektors würde Aufschluss geben, wie hoch der Fehler sein kann.

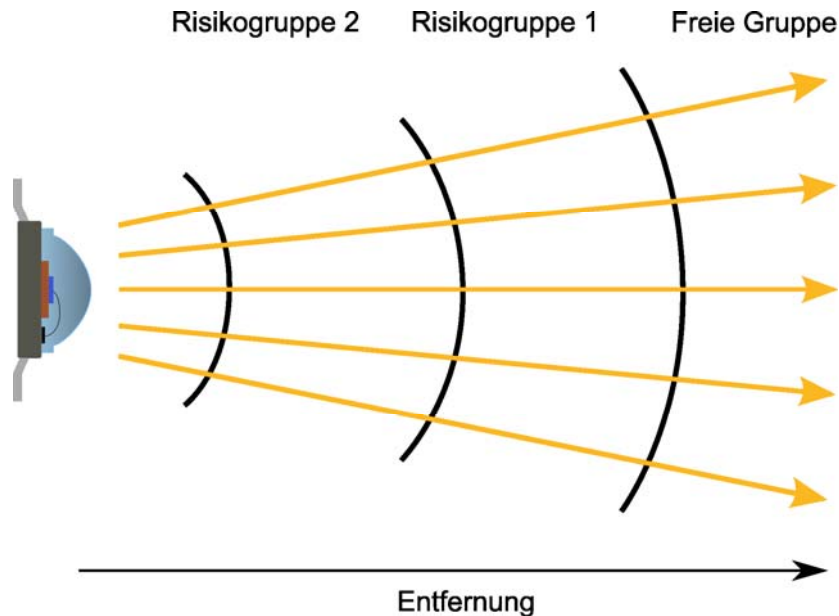


Abb. 8.1 Das Risiko bei Quellen inkohärenter optischer Strahlung, wie etwa LED, nimmt mit dem Abstand ab

Im Rahmen dieses Projektes wurden überwiegend LED im sichtbaren Spektralbereich untersucht. Es wurde nur beispielhaft je eine LED, die im UV- bzw. im IR-Spektralbereich emittiert, beurteilt. Es wäre wünschenswert, eine Untersuchung mehrerer solcher LED durchzuführen, um einen umfassenden Überblick über photobiologische Sicherheit von LED auch in diesen Spektralbereichen zu bekommen.

Tab. 8.1 Einteilung der untersuchten LED im sichtbaren Spektralbereich in Risikogruppen der Lampensicherheitsnorm DIN EN 62471. Die Einstufung in die Risikogruppen 1 oder 2 erfolgte ausschließlich aufgrund der photochemischen Netzhautgefährdung. Für LED-Quellen, die in die Risikogruppen 1 oder 2 eingestuft wurden, weist die letzte Spalte die maximal zulässige Expositionsdauer t_{\max} bei direkter Betrachtung der jeweiligen LED-Quelle aus. Die Freie Gruppe zeichnet sich dadurch aus, dass von ihr keine photobiologische Gefährdung ausgeht.

LED-Typ		Risikogruppe	Maximale Expositionsdauer t_{\max}/s	
Einzel-LED	Golden Dragon ohne Linse (OSRAM)	LB W5SM blau	1	102
		LCW W5SM warmweiß	Freie Gruppe	
		LUW W5SM kaltweiß	2	15
		ZW W5SG kaltweiß	1	204
	Golden Dragon mit Linse (OSRAM)	LCW W51M warmweiß	1	337
		LCW W55M warmweiß	1	452
		LW W51M kaltweiß	2	61
		LW W55M kaltweiß	1	169
		LUW W5KM kaltweiß	Freie Gruppe	
	Golden Dragon Plus (OSRAM)	LA W5AM amber	Freie Gruppe	
		LR W5AM rot	Freie Gruppe	
		LY W5AM gelb	Freie Gruppe	
		LW W5AM kaltweiß	1	102
		LUW W5AM kaltweiß	2	20
	Platinum Dragon (OSRAM)	LA W5SN amber	Freie Gruppe	
		LR W5SN rot	Freie Gruppe	
LCW W5SN warmweiß		Freie Gruppe		
LW W5SN kaltweiß		1	158	

Tab. 8.1 Fortsetzung

LED-Typ		Risikogruppe	Maximale Expositionsdauer t_{max}/s	
Einzel-LED	Diamond Dragon (OSRAM)	LB W5AP blau	2	12
		LD W5AP blau	2	10
		LT W5AP grün	Freie Gruppe	
		LR W5AP rot	Freie Gruppe	
		LCW W5AP warmweiß	1	293
		LUW W5AP kaltweiß	2	35
		LW W5AP kaltweiß	2	23
	Oslux (OSRAM)	LW F65G kaltweiß	1	112
	ELS (Roithner)	ELS blau	2	70
		ELS grün	1	1669
		ELS amber	Freie Gruppe	
		ELS rot	Freie Gruppe	
	HP 803 (Roithner)	HP 803 NB blau	2	29
		HP 803 NR rot	Freie Gruppe	
		HP 803 NW kaltweiß	1	187
Z-Power-LED P7 (Seoul)	W724C0 kaltweiß	2	49	
LED-Taschenlampen	Taschenlampe (Zweibrüder)	Lenser T7	2	43
		Lenser X21	2	46
		Lenser v ²	1	183
LED-Lampen	Lampe MR-16, 3 W (Omnilux)	MR-16 blau	2	73
		MR-16 gelb	Freie Gruppe	
		MR-16 grün	Freie Gruppe	
		MR-16 rot	Freie Gruppe	
		MR-16 warmweiß	Freie Gruppe	
LED-Reflektor	Reflektor, 3W (Paulmann)	Reflektor 280.53 kaltweiß	1	189

Literaturverzeichnis

- [1] **Angerstein, J.:** Neuer Stand der Regelungen für LEDs, *Tagungsdokumentation „Optische Strahlung - Aktuelle Entwicklungen in Forschung und Regelsetzung“*, Informationsveranstaltung am 12. Juni 2007, S. 20-33, Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, Dortmund (2007)
- [2] **ANSES - French agency for food, environmental and occupational health and safety:** Effets sanitaires des systèmes d'éclairage utilisant des diodes électroluminescentes (LED), *Rapport d'expertise collective* (2010)
- [3] **Arbeitsschutzgesetz (ArbSchG)** vom 7. August 1996 (BGBl. I S. 1246), zuletzt geändert durch Artikel 6 des Gesetzes vom 30. Oktober 2008 (BGBl. I S. 2130)
<http://www.bmas.de/DE/Service/Gesetze/arbschg.html>
- [4] **Baur, J.; Baumann, F.; Peter, M.; Engl, K.; Zehnder, U.; Off, J.; Kümmler, W.; Kirsch, M.; Strauss, J.; Wirth, R.; Streubel, K.; Hahn, B.:** Status of high efficiency and high power ThinGaN[®]-LED development, *Phys. Stat. Sol. (c)* **6**, Supplement, International Workshop on Nitride Semiconductors (IWN 2008), S905-S908 (2009)
- [5] **Berson, D. M.; Dunn, F. A. and Takao, M.:** Phototransduction by retinal ganglion cells that set the circadian clock, *Science* **295**, 1070-1073 (2002)
- [6] **Bertoldi, P. and Atanasiu, B.:** Electricity consumption and efficiency trends in the enlarged European Union, *EUR 22753 EN* (2006)
<http://re.jrc.ec.europa.eu/energyefficiency/pdf/EnEff%20Report%202006.pdf>
- [7] **Bowmaker, J. K. and Dartnall, J. A.:** Visual pigments of rods and cones in a human retina, *J. Physiol.* **298**, 501-511 (1980)
- [8] **Brainard, G. C.; Hanifin, J. P.; Greeson, J. M.; Byrne, B.; Glickman, G.; Gerner, E.; Rollag, M.:** Action spectrum for melatonin regulation in humans: Evidence for a novel circadian photoreceptor, *J. Neurosci.* **21** (16), 6405-6412 (2001)
- [9] **Demtröder, W.:** Experimentalphysik 2: Elektrizität und Optik, Springer Verlag, Berlin (2008)
- [10] **DIN EN 14255-1:2005-06:** Messung und Beurteilung von personenbezogenen Expositionen gegenüber inkohärenter optischer Strahlung - Teil 1: Von künstlichen Quellen am Arbeitsplatz emittierte ultraviolette Strahlung; Deutsche Fassung EN 14255-1:2005, Beuth Verlag, Berlin

- [11] **DIN EN 14255-2:2006-03**: Messung und Beurteilung von personenbezogenen Expositionen gegenüber inkohärenter optischer Strahlung - Teil 2: Sichtbare und infrarote Strahlung künstlicher Quellen am Arbeitsplatz; Deutsche Fassung EN 14255-2:2005, Beuth Verlag, Berlin
- [12] **DIN EN 60825-1 Berichtigung 1; VDE 0837-1 Berichtigung 1:2008-12: 2008-12: Sicherheit von Lasereinrichtungen - Teil 1**: Klassifizierung von Anlagen und Anforderungen (IEC 60825-1:2007); Deutsche Fassung EN 60825-1: 2007, Berichtigung zu DIN EN 60825-1 (VDE 0837-1):2008-05, Beuth Verlag, Berlin
- [13] **DIN EN 60825-2; VDE 0837-2:2011-06:2011-06**: Sicherheit von Lasereinrichtungen - Teil 2: Sicherheit von Lichtwellenleiter-Kommunikationssystemen (LWLKS) (IEC 60825-2:2004 + A1:2006 + A2:2010); Deutsche Fassung EN 60825-2:2004 + A1:2007 + A2:2010, Beuth Verlag, Berlin
- [14] **DIN EN 60825-12; VDE 0837-12:2004-12:2004-12**: Sicherheit von Lasereinrichtungen - Teil 12: Sicherheit von optischen Freiraumkommunikationssystemen für die Informationsübertragung (IEC 60825-12:2004); Deutsche Fassung EN 60825-12:2004, Beuth Verlag, Berlin
- [15] **DIN EN 62471; VDE 0837-471:2009-03:2009-03**: Photobiologische Sicherheit von Lampen und Lampensystemen (IEC 62471:2006, modifiziert); Deutsche Fassung EN 62471:2008, Beuth Verlag, Berlin
- [16] **DIN EN 62471 Beiblatt 1; VDE 0837-471 Beiblatt 1:2010-06:2010-06**: Photobiologische Sicherheit von Lampen und Lampensystemen - Teil 2: Leitfaden für Herstelleranforderungen bezüglich der Strahlungssicherheit von optischen Quellen, die keine Laser sind (IEC/TR 62471-2:2009), Beuth Verlag, Berlin
- [17] **Ein unverbindlicher Leitfaden zur Richtlinie 2006/25/EG über künstliche optische Strahlung**, Europäische Union (2011)
<http://ec.europa.eu/social/main.jsp?catId=148&langId=en&pubId=5926&type=2&furtherPubs=yes>
- [18] **Empfehlung der Strahlenschutzkommission (SSK)**: Blendung durch natürliche und neue künstliche Lichtquellen und ihre Gefahren (2006)
www.ssk.de/SharedDocs/Beratungsergebnisse_PDF/2006/Blendung_Lichtquellen.html
- [19] **Gesetz über die Bereitstellung von Produkten auf dem Markt (Produktsicherheitsgesetz - ProdSG)**, BGBl. I, Nr. 57, S. 2178-2208, 11. November 2011
http://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/prodsg_2011/gesamt.pdf
- [20] **Ham, W. T. Jr.; Ruffolo, J. J.; Mueller, H. A. and Guerry, Du Pont III**: The nature of retinal radiation damage: Dependence of wavelength, power level and exposure time, *Vision Res.* **20** (12), 1105-1111 (1980)

- [21] **Ham, W. T., Jr. and Mueller, H. A.:** The photo pathology and nature of the blue-light and near-UV retinal lesion produced by lasers and other optical sources, In: *Laser applications in medicine and biology* **4**, pp. 191-246, Plenum Press, New York (1989)
- [22] **Helbig, H. B.; Halbritter, H. und Lang, D.:** Photobiologische Sicherheit von LED und anderen Lichtquellen, In: *Nichtionisierende Strahlung in Arbeit und Umwelt, Proceedings der 43. Jahrestagung des Fachverbandes für Strahlenschutz, Dortmund, 19.-21. September 2011*, Hrsg. Reidenbach, H.-D.; Dollinger, K.; Ott, G., S. 529-532 (2011)
- [23] **Holonyak, N., Jr. and Bevacqua, S. F.:** Coherent (visible) light emission from Ga(As_{1-x}P_x) Junctions, *Appl. Phys. Lett.* **1** (1), 82-83 (1962)
- [24] **Horak, W.:** Nationale Umsetzung der EU-Richtlinie und ihre Anwendungen: Produktnormen zu Lasern, Lampen und LED, *Tagungsdokumentation der Informationsveranstaltung „Optische Strahlung 2010“* am 1. Juli 2010, S. 13-17, Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, Dortmund (2010)
- [25] **IEC 60825-1, Ed. 2.0:2007-03:** Safety of laser products - Part 1: Equipment classification and requirements
- [26] **International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP):** Guidelines on limits of exposure to ultraviolet radiation of wavelengths between 180 nm and 400 nm (incoherent optical radiation), *Health Phys.* **87** (2), 171-186 (2004)
- [27] **International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP):** Guidelines on limits of exposure to broad-band incoherent optical radiation (0.38 to 3µm), *Health Phys.* **73** (3), 539-554 (1997)
- [28] **International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP):** Statement on light-emitting diodes (LEDs) and laser diodes: Implications for hazard assessment, *Health Phys.* **78** (6), 744-751 (2000)
- [29] **Krückeberg, J.:** Hochleistungs-LEDs in der Praxis, Franzis Verlag, Poing (2007)
- [30] **Lang, D.:** Der richtige Einsatz von blauen Spektralanteilen in der Beleuchtung, In: *Nichtionisierende Strahlung in Arbeit und Umwelt, Proceedings der 43. Jahrestagung des Fachverbandes für Strahlenschutz, Dortmund, 19.-21. September 2011*, Hrsg. Reidenbach, H.-D.; Dollinger, K.; Ott, G., S. 489-499 (2011)
- [31] **Laubsch, A.; Sabathil, M.; Hahn, B. und Streubel, K.:** Licht aus Kristallen, *Phys. J.* **9** (1) 23-28 (2010)
- [32] **van der Leun, J. C.:** Theory of ultraviolet erythema, *Photochem. Photobiol.* **4**, 453-458 (1965)

- [33] **Light's Labour's Lost:** Policies for energy-efficient lighting, International Energy Agency, OECD Publishing (2006)
www.iea.org/publications/freepublications/publication/light2006.pdf
- [34] **Lydahl, E.:** Infrared radiation and cataract, *Acta Ophthalmol.* **166** (Supplement), pp. 1-63 (1984)
- [35] **Mainusch, F:** Risikobewertung von Licht emittierenden Dioden (LED) im sichtbaren Spektralbereich. Photochemische und thermische Netzhautschädigung, Bachelorarbeit, Technische Fachhochschule Georg Agricola zu Bochum (2012)
- [36] **Meredith, P. and Riesz, J.:** Radiative relaxation quantum yields for synthetic eumelanin, *Photochem. Photobiol.* **79**, 211-216 (2004)
- [37] **Nakamura, S.; Mukai, T.; Sengh, M.:** Candela-class high-brightness InGan-AlGan double heterostructure blue light-emitting diodes, *Appl. Phys. Lett.* **64** (13), 1687-1689 (1994)
- [38] **Narukawa, Y.; Ichikawa, M.; Sanga, D.; Sano, M. and Mukai, T.:** White light emitting diodes with super-high luminous efficacy, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **43**, 1-6 (2010)
- [39] **Ness, J. W.; Zwick, H.; Stuck, D. J.; Lund, B. J.; Molchany, J. W.; Sliney, D. H.:** Retinal image motion during deliberate fixation: Implications to laser safety for long duration viewing, *Health Phys.* **78**, 131-141 (2000)
- [40] **Okuno, T.:** Thermal effect of infra-red radiation on the eye. A study based on a model, *Ann. Occup. Hyg.* **35**, 1-12 (1991)
- [41] **OSRAM Opto Semiconductors and Siemens Corporate Technology:** Life Cycle Assessment of Illuminants. A Comparison of Light Bulbs, Compact Fluorescent Lamps and LED Lamps (2009)
www.osram-os.com/life-cycle-assessment
- [42] **Ott, G.; Udovičić, L.; Romanus, E.:** Europäischer Leitfaden zur EU-Richtlinie 2006/25/EG über künstliche optischer Strahlung, In: *Nichtionisierende Strahlung in Arbeit und Umwelt, Proceedings der 43. Jahrestagung des Fachverbandes für Strahlenschutz, Dortmund, 19.-21. September 2011*, Hrsg. Reidenbach, H.-D.; Dollinger, K.; Ott, G., S. 397-401 (2011)
- [43] **Pitts, D. G. and Tredici, T. J.:** The effects of ultraviolet on the eye, *Am. Ind. Hyg. Assoc. J.* **32** (4), 235-246 (1971)
- [44] **Qiu, X.; Kumbalasiri, T.; Carlson, S. M.; Wong, K. Y.; Krishna, V.; Provenzio, I. and Berson, D. M.:** Induction of photosensitivity by heterologous expression of melanopsin, *Nature* **433**, 745-749 (2005)
- [45] **Reidel, G. A.:** Photonik: Eine Einführung in die Grundlagen, Springer, Wien (2006)

- [46] **Reidenbach, H.-D.; Dollinger, K. und Hofmann, J.:** Überprüfung der Laserklassifizierung unter Berücksichtigung des Lidschlussreflexes, Schriftreihe der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, Wirtschaftsverlag NW, Bremerhaven (2003)
- [47] **Reidenbach, H.-D.; Dollinger, K.; Ott, G.; Janßen, M. und Brose, M.:** Blendung durch optische Strahlungsquellen, Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, Dortmund (2008)
- [48] **Richtlinie 2001/95/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 3. Dezember 2001 über die allgemeine Produktsicherheit**, ABl. EG, L 11, S. 4-17, 15. Januar 2002
<http://eurlex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2002:011:0004:0017:de:pdf>
- [49] **Richtlinie 2006/25/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 5. April 2006 über Mindestvorschriften zum Schutz von Sicherheit und Gesundheit der Arbeitnehmer vor der Gefährdung durch physikalische Einwirkungen (künstliche optische Strahlung)** (19. Einzelrichtlinie im Sinne des Artikels 16 Absatz 1 der Richtlinie 89/391/EWG), ABl. EU, L114, S. 38-59, 27. April 2006
<http://eurlex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2006:114:0038:0059:de:pdf>
- [50] **Richtlinie 2006/95/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 12. Dezember 2006 zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten betreffend elektrische Betriebsmittel zur Verwendung innerhalb bestimmter Spannungsgrenzen**, ABl. EG, L 374, S. 10-19, 27. Dezember 2006
<http://eurlex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2006:374:0010:0019:de:pdf>
- [51] **Romanus, E.; Udovičić, L.; Ott, G.:** Technische Regeln für die deutsche Arbeitsschutzverordnung zu künstlicher optischer Strahlung, In: *Nichtionisierende Strahlung in Arbeit und Umwelt, Proceedings der 43. Jahrestagung des Fachverbandes für Strahlenschutz, Dortmund, 19.-21. September 2011*, Hrsg. Reidenbach, H.-D.; Dollinger, K.; Ott, G., S. 413-418 (2011)
- [52] **Schulmeister, K.:** Revision der ICNIRP-Guidelines zu inkohärenter Breitband- und Laserstrahlung, In: *Nichtionisierende Strahlung in Arbeit und Umwelt, Proceedings der 43. Jahrestagung des Fachverbandes für Strahlenschutz, Dortmund, 19.-21. September 2011*, Hrsg. Reidenbach, H.-D.; Dollinger, K.; Ott, G., S. 21-45 (2011)
- [53] **Schulmeister, K.:** Die internationale Lampensicherheitsnorm, *Strahlenschutz aktuell* **44** (1), 28-36 (2010)
- [54] **Schwarz, U. T. und Scholz, F.:** Rosige Aussichten für grünes Licht, *Phys. J.* **10** (2), 21-26 (2011)

- [55] **Sliney, D. H. and Wolbarsht, M. L.:** Safety with lasers and other optical sources, Plenum Press, New York (1980)
- [56] **Stellungnahme der Strahlenschutzkommission (SSK):** Moderne Lichtquellen (2010)
www.ssk.de/SharedDocs/Beratungsergebnisse_PDF/2010/2010_06.html
- [57] **Sutter, E.:** Schutz vor optischer Strahlung, VDE-Verlag, Berlin (2008)
- [58] **Taylor, H. R.; West, S. K.; Rosenthal, F. S.; Muñoz, B.; Newland, H. S.; Abbey, H. and Emmett, E. A.:** Effect of ultraviolet radiation on cataract formation, *N. Engl. J. Med.* **319**, 1429-1433 (1988)
- [59] **Theiss, E.:** Beleuchtungstechnik: neue Technologien der Innen- und Aussenbeleuchtung, Oldenbourg Industrieverlag (2000)
- [60] **Udovičić, L.; Mainusch F.; Janßen, M.; Ott, G.; Romanus, R.:** Photobiologische Sicherheit von Licht emittierenden Dioden, In: *Nichtionisierende Strahlung in Arbeit und Umwelt, Proceedings der 43. Jahrestagung des Fachverbandes für Strahlenschutz, Dortmund, 19.-21. September 2011*, Hrsg. Reidenbach, H.-D.; Dollinger, K.; Ott, G., S. 517-526 (2011)
- [61] **Udovičić, L.; Janßen, M.; Ott, G.; Mainusch, F.; Romanus, E.:** Risikobewertung von Licht emittierenden Dioden (LED), In: *Informationsveranstaltung Optische Strahlung 2010 - Nationale Umsetzung der EU-Richtlinie 2006/25/EG „Künstliche optische Strahlung“ am 1. Juli 2010*, Hrsg. Janßen, M., Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, Dortmund, S. 25-33 (2010)
- [62] **Vamberszky, K. und Sabine Wick, S.:** Licht zum Wohlfühlen, *Phys. J.* **9** (1) 43-45 (2010)
- [63] **Vees, G.; Schulmeister, K.; Kitz, E.; Brusl, H.:** Projekt SAFE-LED. Gesundheitsrisiken durch neuartige Hochleistungs-Leuchtdioden (LED), AUVA-Report Nr. 51 (2010)
- [64] **Verordnung zur arbeitsmedizinischen Vorsorge (ArbMedVV)** vom 18. Dezember 2008 (BGBl. I S. 2768), die zuletzt durch Artikel 5 Absatz 8 der Verordnung vom 26. November 2010 (BGBl. I S. 1643) geändert worden ist
<http://www.gesetze-im-internet.de/arbmedvv/index.html>
- [65] **Verordnung zur Umsetzung der Richtlinie 2006/25/EG zum Schutz der Arbeitnehmer vor Gefährdungen durch künstliche optische Strahlung und zur Änderung von Arbeitsschutzverordnungen**, *Bundesgesetzblatt*, Jahrgang 2010, Teil I, Nr. 38, S. 960, 26. Juli 2010
<http://bundesrecht.juris.de/bundesrecht/ostrv/gesamt.pdf>

- [66] **Verordnung (EG) Nr. 244/2009 der Kommission vom 18. März 2009 zur Durchführung der Richtlinie 2005/32/EG des Europäischen Parlaments und des Rates im Hinblick auf die Festlegung von Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung von Haushaltslampen mit ungebündeltem Licht**
<http://eurlex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2009:076:0003:0016:de:pdf>
- [67] **Vogel, M.:** Warmes Licht für kalte Tage, *Phys. J.* **10** (11), S. 44-45 (2011)
- [68] **Weber, M.; Grabner, U. and Schulmeister, K.:** Hazard assessment of LEDs by different safety standards, *Proceedings of the 25th Session of the CIE*, San Diego, USA, 25 June - 2 July 2003, D6 36-37 (2003)
- [69] **Weber, M.; Schulmeister, K.; Kitz, E.; Brusl, H.:** Vereinfachte Beurteilung einer möglichen Überschreitung der Grenzwerte für optische Breitbandstrahlung auf Basis des Blendungseindruckes und der Oberflächentemperatur, In: *Nicht-ionisierende Strahlung in Arbeit und Umwelt, Proceedings der 43. Jahrestagung des Fachverbandes für Strahlenschutz, Dortmund, 19.-21. September 2011*, Hrsg. Reidenbach, H.-D.; Dollinger, K.; Ott, G., S. 444-460 (2011)
- [70] **Wessler, B. und Wiesmann, Ch.:** Leuchten auf Energiesparkurs, *Phys. J.* **9**, 31-33 (2010)
- [71] **Wikipedia: Lux (Einheit)**
http://de.wikipedia.org/wiki/Lux_%28Einheit%29
- [72] **World Health Organisation (WHO):** Ultraviolet Radiation, *Environmental health criteria* **14** (1979)
- [73] **World Health Organisation (WHO):** Lasers and optical radiation, *Environmental health criteria* **23** (1982)

Tabellenverzeichnis

		Seite
Tab. 2.1	Spektralbereiche der optischen Strahlung	12
Tab. 3.1	Mögliche Auswirkungen und Schädigungen bei der Einwirkung optischer Strahlung auf das Auge und die Haut	28
Tab. 4.1	Gegenüberstellung der wichtigsten radiometrischen und photometrischen Größen	34
Tab. 4.2	Typische Beleuchtungsstärken und Leuchtdichten (aus [71])	34
Tab. 5.1	Zusammenfassung der zu beurteilenden photobiologischen Gefährdungen mit respektiven Spektralbereichen, physikalischen Größen und Wirkungsfunktionen	48
Tab. 5.2	Expositionsgrenzwerte für inkohärente optische Strahlung aus der Europäischen Richtlinie 2006/25/EG „Künstliche optische Strahlung“	49
Tab. 6.1	Risikogruppen für Dauerstrichlampen nach der Lampensicherheitsnorm DIN EN 62471	54
Tab. 6.2	Emissionsgrenzwerte der Risikogruppen mit entsprechenden maximalen Expositionsdauern für Dauerstrichlampen nach der Lampensicherheitsnorm DIN EN 62471	56
Tab. 6.3	Limitierende Feldblende zur Beurteilung der photobiologischen Gefährdungen, die auf Messungen der Bestrahlungsstärke basieren	58
Tab. 6.4	Empfangswinkel zur Messung der Strahldichte bei der Beurteilung der photochemischen und der thermischen Netzhautgefährdung	61
Tab. 6.5	Empfohlene Bandbreiten für Messungen nach der Lampensicherheitsnorm DIN EN 62471	65
Tab. 6.6	Empfohlene Wellenlängengenauigkeit für Messungen nach der Lampensicherheitsnorm DIN EN 62471	65
Tab. 7.1	Messwerte der effektiven Strahldichte $(L_B)_{\text{mess}}$ für die photochemische und $(L_R)_{\text{mess}}$ für die thermische Netzhautgefährdung der LED HP 803 NW sowie die dazugehörigen Emissionsgrenzwerte nach der Lampensicherheitsnorm	75

Tab. 7.2	Messwerte der effektiven Bestrahlungsstärke $(E_B)_{\text{mess}}$ für die photochemische Netzhautgefährdung der LED HP 803 NW sowie die dazugehörigen Emissionsgrenzwerte nach der Lampensicherheitsnorm	76
Tab. 7.3	Messwerte der effektiven Strahldichte $(L_B)_{\text{mess}}$ für die photochemische und $(L_R)_{\text{mess}}$ für die thermische Netzhautgefährdung der LED LD W5AP sowie die dazugehörigen Emissionsgrenzwerte nach der Lampensicherheitsnorm	78
Tab. 7.4	Messwerte der effektiven Strahldichte $(L_B)_{\text{mess}}$ für die photochemische und $(L_R)_{\text{mess}}$ für die thermische Netzhautgefährdung der Rotlicht emittierenden LED ELS und die dazugehörigen Emissionsgrenzwerte nach der Lampensicherheitsnorm	80
Tab. 7.5	Messwerte der effektiven Bestrahlungsstärke $(E_S)_{\text{mess}}$ für die aktinische UV-Gefährdung, der Bestrahlungsstärke $(E_{\text{UVA}})_{\text{mess}}$ für die UV-A-Gefährdung der Augen und der effektiven Strahldichte $(L_B)_{\text{mess}}$ für die photochemische Netzhautgefährdung der UV-LED 365 mit dazugehörigen Emissionsgrenzwerten nach der Lampensicherheitsnorm	83
Tab. 7.6	Messwerte der effektiven Strahldichte $(L_{\text{IR}})_{\text{mess}}$ für die thermische Netzhautgefährdung (schwacher visueller Reiz) und der Bestrahlungsstärke $(E_{\text{IR}})_{\text{mess}}$ für IR-Gefährdung der Augen der IR-LED SFH 4230 mit dazugehörigen Emissionsgrenzwerten nach der Lampensicherheitsnorm	85
Tab. 8.1	Einteilung der untersuchten LED im sichtbaren Spektralbereich in Risikogruppen der Lampensicherheitsnorm DIN EN 62471	89
Tab. B 1.1	Messwerte der effektiven Strahldichte $(L_B)_{\text{mess}}$ für die photochemische und $(L_R)_{\text{mess}}$ für die thermische Netzhautgefährdung der LED LB W5SM sowie die dazugehörigen Emissionsgrenzwerte nach der Lampensicherheitsnorm	116
Tab. B 1.2	Messwerte der effektiven Strahldichte $(L_B)_{\text{mess}}$ für die photochemische und $(L_R)_{\text{mess}}$ für die thermische Netzhautgefährdung der LED LCW W5SM sowie die dazugehörigen Emissionsgrenzwerte nach der Lampensicherheitsnorm	118
Tab. B 1.3	Messwerte der effektiven Strahldichte $(L_B)_{\text{mess}}$ für die photochemische und $(L_R)_{\text{mess}}$ für die thermische Netzhautgefährdung der LED LUW W5SM sowie die dazugehörigen Emissionsgrenzwerte nach der Lampensicherheitsnorm	120

Tab. B 1.4	Messwerte der effektiven Strahldichte $(L_B)_{\text{mess}}$ für die photochemische und $(L_R)_{\text{mess}}$ für die thermische Netzhautgefährdung der LED ZW W5SG sowie die dazugehörigen Emissionsgrenzwerte nach der Lampensicherheitsnorm	122
Tab. B 2.1	Messwerte der effektiven Strahldichte $(L_B)_{\text{mess}}$ für die photochemische und $(L_R)_{\text{mess}}$ für die thermische Netzhautgefährdung der LED LCW W51M sowie die dazugehörigen Emissionsgrenzwerte nach der Lampensicherheitsnorm	124
Tab. B 2.2	Messwerte der effektiven Strahldichte $(L_B)_{\text{mess}}$ für die photochemische und $(L_R)_{\text{mess}}$ für die thermische Netzhautgefährdung der LED LCW W55M sowie die dazugehörigen Emissionsgrenzwerte nach der Lampensicherheitsnorm	126
Tab. B 2.3	Messwerte der effektiven Strahldichte $(L_B)_{\text{mess}}$ für die photochemische und $(L_R)_{\text{mess}}$ für die thermische Netzhautgefährdung der LED LW W51M sowie die dazugehörigen Emissionsgrenzwerte nach der Lampensicherheitsnorm	128
Tab. B 2.4	Messwerte der effektiven Strahldichte $(L_B)_{\text{mess}}$ für die photochemische und $(L_R)_{\text{mess}}$ für die thermische Netzhautgefährdung der LED LW W55M sowie die dazugehörigen Emissionsgrenzwerte nach der Lampensicherheitsnorm	130
Tab. B 2.5	Messwerte der effektiven Strahldichte $(L_B)_{\text{mess}}$ für die photochemische und $(L_R)_{\text{mess}}$ für die thermische Netzhautgefährdung der LED LUW W5KM sowie die dazugehörigen Emissionsgrenzwerte nach der Lampensicherheitsnorm	132
Tab. B 3.1	Messwerte der effektiven Strahldichte $(L_B)_{\text{mess}}$ für die photochemische und $(L_R)_{\text{mess}}$ für die thermische Netzhautgefährdung der LED LA W5AM sowie die dazugehörigen Emissionsgrenzwerte nach der Lampensicherheitsnorm	134
Tab. B 3.2	Messwerte der effektiven Strahldichte $(L_B)_{\text{mess}}$ für die photochemische und $(L_R)_{\text{mess}}$ für die thermische Netzhautgefährdung der LED LR W5AM sowie die dazugehörigen Emissionsgrenzwerte nach der Lampensicherheitsnorm	136
Tab. B 3.3	Messwerte der effektiven Strahldichte $(L_B)_{\text{mess}}$ für die photochemische und $(L_R)_{\text{mess}}$ für die thermische Netzhautgefährdung der LED LY W5AM sowie die dazugehörigen Emissionsgrenzwerte nach der Lampensicherheitsnorm	138
Tab. B 3.4	Messwerte der effektiven Strahldichte $(L_B)_{\text{mess}}$ für die photochemische und $(L_R)_{\text{mess}}$ für die thermische Netzhautgefährdung der LED LW W5AM sowie die dazugehörigen Emissionsgrenzwerte nach der Lampensicherheitsnorm	140

Tab. B 3.5	Messwerte der effektiven Strahldichte $(L_B)_{\text{mess}}$ für die photochemische und $(L_R)_{\text{mess}}$ für die thermische Netzhautgefährdung der LED LUW W5AM sowie die dazugehörigen Emissionsgrenzwerte nach der Lampensicherheitsnorm	142
Tab. B 4.1	Messwerte der effektiven Strahldichte $(L_B)_{\text{mess}}$ für die photochemische und $(L_R)_{\text{mess}}$ für die thermische Netzhautgefährdung der LED LA W5SN sowie die dazugehörigen Emissionsgrenzwerte nach der Lampensicherheitsnorm	144
Tab. B 4.2	Messwerte der effektiven Strahldichte $(L_B)_{\text{mess}}$ für die photochemische und $(L_R)_{\text{mess}}$ für die thermische Netzhautgefährdung für LED LR W5SN sowie die dazugehörigen Emissionsgrenzwerte nach der Lampensicherheitsnorm	146
Tab. B 4.3	Messwerte der effektiven Strahldichte $(L_B)_{\text{mess}}$ für die photochemische und $(L_R)_{\text{mess}}$ für die thermische Netzhautgefährdung für LED LCW W5SN sowie die dazugehörigen Emissionsgrenzwerte nach der Lampensicherheitsnorm	148
Tab. B 4.4	Messwerte der effektiven Strahldichte $(L_B)_{\text{mess}}$ für die photochemische und $(L_R)_{\text{mess}}$ für die thermische Netzhautgefährdung der LED LW W5SN sowie die dazugehörigen Emissionsgrenzwerte nach der Lampensicherheitsnorm	150
Tab. B 5.1	Messwerte der effektiven Strahldichte $(L_B)_{\text{mess}}$ für die photochemische und $(L_R)_{\text{mess}}$ für die thermische Netzhautgefährdung der LED LB W5AP sowie die dazugehörigen Emissionsgrenzwerte nach der Lampensicherheitsnorm	152
Tab. B 5.2	Messwerte der effektiven Strahldichte $(L_B)_{\text{mess}}$ für die photochemische und $(L_R)_{\text{mess}}$ für die thermische Netzhautgefährdung der LED LT W5AP sowie die dazugehörigen Emissionsgrenzwerte nach der Lampensicherheitsnorm	154
Tab. B 5.3	Messwerte der effektiven Strahldichte $(L_B)_{\text{mess}}$ für die photochemische und $(L_R)_{\text{mess}}$ für die thermische Netzhautgefährdung für LED LR W5AP sowie die dazugehörigen Emissionsgrenzwerte nach der Lampensicherheitsnorm	156
Tab. B 5.4	Messwerte der effektiven Strahldichte $(L_B)_{\text{mess}}$ für die photochemische und $(L_R)_{\text{mess}}$ für die thermische Netzhautgefährdung für LED LCW W5AP sowie die dazugehörigen Emissionsgrenzwerte nach der Lampensicherheitsnorm	158
Tab. B 5.5	Messwerte der effektiven Strahldichte $(L_B)_{\text{mess}}$ für die photochemische und $(L_R)_{\text{mess}}$ für die thermische Netzhautgefährdung der LED LUW W5AP sowie die dazugehörigen Emissionsgrenzwerte nach der Lampensicherheitsnorm	160

Tab. B 5.6	Messwerte der effektiven Strahldichte $(L_B)_{\text{mess}}$ für die photochemische und $(L_R)_{\text{mess}}$ für die thermische Netzhautgefährdung der LED LW W5AP sowie die dazugehörigen Emissionsgrenzwerte nach der Lampensicherheitsnorm	162
Tab. B 6.1	Messwerte der effektiven Strahldichte $(L_B)_{\text{mess}}$ für die photochemische und $(L_R)_{\text{mess}}$ für die thermische Netzhautgefährdung der LED LW F65G sowie die dazugehörigen Emissionsgrenzwerte nach der Lampensicherheitsnorm	164
Tab. B 7.1	Messwerte der effektiven Strahldichte $(L_B)_{\text{mess}}$ für die photochemische und $(L_R)_{\text{mess}}$ für die thermische Netzhautgefährdung der LED ELS blau sowie die dazugehörigen Emissionsgrenzwerte nach der Lampensicherheitsnorm	166
Tab. B 7.2	Messwerte der effektiven Strahldichte $(L_B)_{\text{mess}}$ für die photochemische und $(L_R)_{\text{mess}}$ für die thermische Netzhautgefährdung der LED ELS grün sowie die dazugehörigen Emissionsgrenzwerte nach der Lampensicherheitsnorm	168
Tab. B 7.3	Messwerte der effektiven Strahldichte $(L_B)_{\text{mess}}$ für die photochemische und $(L_R)_{\text{mess}}$ für die thermische Netzhautgefährdung der LED ELS amber sowie die dazugehörigen Emissionsgrenzwerte nach der Lampensicherheitsnorm	170
Tab. B 8.1	Messwerte der effektiven Strahldichte $(L_B)_{\text{mess}}$ für die photochemische und $(L_R)_{\text{mess}}$ für die thermische Netzhautgefährdung für LED HP 803 NB sowie die dazugehörigen Emissionsgrenzwerte nach der Lampensicherheitsnorm	172
Tab. B 8.2	Messwerte der effektiven Strahldichte $(L_B)_{\text{mess}}$ für die photochemische und $(L_R)_{\text{mess}}$ für die thermische Netzhautgefährdung der LED HP 803 NR sowie die dazugehörigen Emissionsgrenzwerte nach der Lampensicherheitsnorm	174
Tab. B 9.1	Messwerte der effektiven Strahldichte $(L_B)_{\text{mess}}$ für die photochemische und $(L_R)_{\text{mess}}$ für die thermische Netzhautgefährdung der LED W724C0 sowie die dazugehörigen Emissionsgrenzwerte nach der Lampensicherheitsnorm. Bei den Messungen mit dem Empfangswinkel γ von 1,7 mrad (Risikogruppe 2) wurde auf einzelne Chips fokussiert.	176
Tab. B 10.1	Messwerte der effektiven Strahldichte $(L_B)_{\text{mess}}$ für die photochemische und $(L_R)_{\text{mess}}$ für die thermische Netzhautgefährdung der LED-Taschenlampe Lenser T7 sowie die dazugehörigen Emissionsgrenzwerte nach der Lampensicherheitsnorm	179

Tab. B 10.2	Messwerte der effektiven Strahldichte $(L_B)_{\text{mess}}$ für die photochemische und $(L_R)_{\text{mess}}$ für die thermische Netzhautgefährdung der LED-Taschenlampe Lenser X21 sowie die dazugehörigen Emissionsgrenzwerte nach der Lampensicherheitsnorm	181
Tab. B 10.3	Messwerte der effektiven Strahldichte $(L_B)_{\text{mess}}$ für die photochemische und $(L_R)_{\text{mess}}$ für die thermische Netzhautgefährdung der LED-Taschenlampe Lenser v ² sowie die dazugehörigen Emissionsgrenzwerte nach der Lampensicherheitsnorm	183
Tab. B 11.1	Messwerte der effektiven Strahldichte $(L_B)_{\text{mess}}$ für die photochemische und $(L_R)_{\text{mess}}$ für die thermische Netzhautgefährdung der LED-Lampe MR-16 blau (Omnilux) sowie die dazugehörigen Emissionsgrenzwerte nach der Lampensicherheitsnorm	185
Tab. B 11.2	Messwerte der effektiven Strahldichte $(L_B)_{\text{mess}}$ für die photochemische und $(L_R)_{\text{mess}}$ für die thermische Netzhautgefährdung der LED-Lampe MR-16 gelb (Omnilux) sowie die dazugehörigen Emissionsgrenzwerte nach der Lampensicherheitsnorm	187
Tab. B 11.3	Messwerte der effektiven Strahldichte $(L_B)_{\text{mess}}$ für die photochemische und $(L_R)_{\text{mess}}$ für die thermische Netzhautgefährdung der LED-Lampe MR-16 grün (Omnilux) sowie die dazugehörigen Emissionsgrenzwerte nach der Lampensicherheitsnorm	189
Tab. B 11.4	Messwerte der effektiven Strahldichte $(L_B)_{\text{mess}}$ für die photochemische und $(L_R)_{\text{mess}}$ für die thermische Netzhautgefährdung der Lampe MR-16 rot (Omnilux) sowie die dazugehörigen Emissionsgrenzwerte nach der Lampensicherheitsnorm	191
Tab. B 11.5	Messwerte der effektiven Strahldichte $(L_B)_{\text{mess}}$ für die photochemische und $(L_R)_{\text{mess}}$ für die thermische Netzhautgefährdung der Lampe MR-16 warmweiß (Omnilux) sowie die dazugehörigen Emissionsgrenzwerte nach der Lampensicherheitsnorm	193
Tab. B 12.1	Messwerte der effektiven Strahldichte $(L_B)_{\text{mess}}$ für die photochemische und $(L_R)_{\text{mess}}$ für die thermische Netzhautgefährdung des LED-Reflektors 280.53 sowie die dazugehörigen Emissionsgrenzwerte nach der Lampensicherheitsnorm	195

Abbildungsverzeichnis

		Seite
Abb. 2.1	Schematischer Aufbau eines LED-Chips	11
Abb. 2.2	Schematischer Aufbau einer LED und die Strahlbündelung durch eine vorgesetzte Linse	12
Abb. 2.3	Die Effizienz für die Konversion von elektrischer zu optischer Leistung (nach [31])	13
Abb. 2.4	Typische LED-Spektren	14
Abb. 2.5	Weißlicht emittierende LED	14
Abb. 2.6	Beispiele für einige LED-Bauformen: T-Typ (a), SMD-LED (b), COB-LED (c). Bildquellen: Sony/Tomshardware.com (a), OSRAM Press Picture (b), www.bridgelux.com (c)	16
Abb. 2.7	Verschiedene LED-Lampen (Bildquelle: www.osram.com)	17
Abb. 3.1	Empfindlichkeitsverteilung der drei Zapfentypen (S-, M- und L-Zapfen) sowie Stäbchen (R); nach [7]	21
Abb. 3.2	Hellempfindlichkeitskurve für das Tagsehen ($V(\lambda)$ -Kurve)	21
Abb. 3.3	Spektrale Empfindlichkeit für Melatonin-Suppression (aus [8])	22
Abb. 3.4	Eindringtiefen optischer Strahlung in das Auge	25
Abb. 3.5	Eindringtiefen optischer Strahlung in die Haut	27
Abb. 4.1	Zur Definition der Winkelausdehnung α einer optischen Strahlungsquelle	29
Abb. 4.2	Scheinbare Quelle	30
Abb. 4.3	Zur Definition des Empfangswinkels γ	31
Abb. 4.4	Zur Definition der Strahldichte	32
Abb. 5.1	Spektrale Wirkungsfunktion $S(\lambda)$ für aktinische UV-Gefährdung der Augen und der Haut	40
Abb. 5.2	Spektrale Wirkungsfunktion $B(\lambda)$ für photochemische Netzhautgefährdung	42

Abb. 5.3	Die Größe des Netzhautbildes und die Winkelausdehnung der Quelle	44
Abb. 5.4	Spektrale Wirkungsfunktion $R(\lambda)$ für thermische Netzhautgefährdung	45
Abb. 6.1	Kontrolle der Emission vs. Kontrolle der Exposition (nach [24])	53
Abb. 6.2	Messprinzip zur Messung der Bestrahlungsstärke	58
Abb. 6.3	Augenbewegungen führen bei steigender Expositionsdauer dazu, dass die Abbildung einer Quelle über eine größere Netzhautfläche „verschmiert“ wird und dadurch das Risiko für eine Netzhautschädigung verringert wird	59
Abb. 6.4	Drei unterschiedliche Empfangswinkel γ (1,7 mrad, 11 mrad und 100 mrad) simulieren die voraussichtliche Expositionsdauer	60
Abb. 6.5	Messprinzip für Strahldichtemessungen nach der Standardmethode	62
Abb. 6.6	Messprinzip des alternativen Strahldichte-Messverfahrens	63
Abb. 6.7	Das Prinzip des Czerny-Turner Monochromators	66
Abb. 6.8	Versuchsaufbau für die Bestrahlungsstärkemessungen	68
Abb. 6.9	Versuchsaufbau für die Strahldichtemessungen	69
Abb. 6.10	Messaufbau für die Messungen der Quellengröße	70
Abb. 7.1	Eine LED des Typs HP 803 NW (Roithner)	72
Abb. 7.2	LED HP 803 NW - scheinbare Quelle	72
Abb. 7.3	Spektrale Strahldichte $L(\lambda)$ der LED HP 803 NW gemessen mit den vorgeschriebenen Empfangswinkeln γ von 1,7 mrad, 11 mrad und 100 mrad	73
Abb. 7.4	Effektive spektrale Strahldichte der LED HP 803 NW: spektrale Strahldichte $L(\lambda)$ bewertet mit der spektralen Wirkungsfunktion für die photochemische Netzhautgefährdung $B(\lambda)$	74
Abb. 7.5	Spektrale Bestrahlungsstärke der LED HP 803 NW	76
Abb. 7.6	LED LD W5AP des Typs Diamond Dragon (OSRAM)	77

Abb. 7.7	LED LD W5AP - scheinbare Quelle	77
Abb. 7.8	Relative spektrale Strahldichte der LED LD W5AP	78
Abb. 7.9	Eine LED des Typs ELS (Roithner)	79
Abb. 7.10	LED ELS rot - scheinbare Quelle	79
Abb. 7.11	Relative spektrale Strahldichte der LED ELS rot	80
Abb. 7.12	UV-LED 365 (Seoul); Quelle: Technical Data Sheet, Seoul Semiconductor	81
Abb. 7.13	Relative spektrale Bestrahlungsstärke der UV-LED 365	82
Abb. 7.14	IR-LED SFH 4230 (OSRAM)	84
Abb. 7.15	IR-LED SFH 4230 - scheinbare Quelle	84
Abb. 7.16	Relative spektrale Strahldichte der IR-LED SFH 4230	85
Abb. 8.1	Das Risiko bei Quellen inkohärenter optischer Strahlung, wie etwa LED, nimmt mit dem Abstand ab	88
Abb. A 1	Zur Bestimmung der Quellengröße: Ein Histogramm zeigt die Häufigkeit der Punkte mit bestimmter Helligkeit: a) 100 % des maximalen Helligkeitwertes b) 50 % des maximalen Helligkeitwertes	112
Abb. A 2	Aufnahme einer LED mit dazugehörigem Histogramm: a) mit Übersteuerung, b) ohne Übersteuerung	113
Abb. A 3	Zur Raster-Kalibrierung	114
Abb. A 4	Messung der scheinbaren Quellengröße	114
Abb. B 1.1	Eine LED des Typs Golden Dragon ohne Linse (OSRAM)	115
Abb. B 1.2	LED LB W5SM - scheinbare Quelle	115
Abb. B 1.3	Relative spektrale Strahldichte der LED LB W5SM	116
Abb. B 1.4	LED LCW W5SM - scheinbare Quelle	117
Abb. B 1.5	Relative spektrale Strahldichte der LED LCW W5SM	117
Abb. B 1.6	LED LUW W5SM - scheinbare Quelle	119
Abb. B 1.7	Relative spektrale Strahldichte der LED LUW W5SM	119

Abb. B 1.8	LED ZW W5SG - scheinbare Quelle	121
Abb. B 1.9	Relative spektrale Strahldichte der LED ZW W5SG	121
Abb. B 2.1	Eine LED des Typs Golden Dragon mit Linse (OSRAM)	123
Abb. B 2.2	LED LCW W51M - scheinbare Quelle	123
Abb. B 2.3	Relative spektrale Strahldichte der LED LCW W51M	124
Abb. B 2.4	LED LCW W55M - scheinbare Quelle	125
Abb. B 2.5	Relative spektrale Strahldichte der LED LCW W55M	125
Abb. B 2.6	LED LW W51M - scheinbare Quelle	127
Abb. B 2.7	Relative spektrale Strahldichte der LED LW W51M	127
Abb. B 2.8	LED LW W55M - scheinbare Quelle	129
Abb. B 2.9	Relative spektrale Strahldichte der LED LW W55M	129
Abb. B 2.10	LED LUW W5KM - scheinbare Quelle	131
Abb. B 2.11	Relative spektrale Strahldichte der LED LUW W5KM	131
Abb. B 3.1	Eine LED des Typs Golden Dragon Plus (OSRAM)	133
Abb. B 3.2	LED LA W5AM - scheinbare Quelle	133
Abb. B 3.3	Relative spektrale Strahldichte der LED LA W5AM	134
Abb. B 3.4	LED LR W5AM - scheinbare Quelle	135
Abb. B 3.5	Relative spektrale Strahldichte der LED LR W5AM	135
Abb. B 3.6	LED LY W5AM - scheinbare Quelle	137
Abb. B 3.7	Relative spektrale Strahldichte der LED LY W5AM	137
Abb. B 3.8	LED LW W5AM - scheinbare Quelle	139
Abb. B 3.9	Relative spektrale Strahldichte der LED LW W5AM	139
Abb. B 3.10	LED LUW W5AM - scheinbare Quelle	141
Abb. B 3.11	Relative spektrale Strahldichte der LED LUW W5AM	141
Abb. B 4.1	Eine LED des Typs Platinum Dragon (OSRAM)	143

Abb. B 4.2	LED LA W5SN - scheinbare Quelle	143
Abb. B 4.3	Relative spektrale Strahldichte der LED LA W5SN	144
Abb. B 4.4	LED LR W5SN - scheinbare Quelle	145
Abb. B 4.5	Relative spektrale Strahldichte der LED LR W5SN	145
Abb. B 4.6	LED LCW W5SN - scheinbare Quelle	147
Abb. B 4.7	Relative spektrale Strahldichte der LED LCW W5SN	147
Abb. B 4.8	LED LW W5SN - scheinbare Quelle	149
Abb. B 4.9	Relative spektrale Strahldichte der LED LW W5SN	149
Abb. B 5.1	Eine LED des Typs Diamond Dragon (OSRAM)	151
Abb. B 5.2	LED LB W5AP - scheinbare Quelle	151
Abb. B 5.3	Relative spektrale Strahldichte der LED LB W5AP	152
Abb. B 5.4	LED LT W5AP - scheinbare Quelle	153
Abb. B 5.5	Relative spektrale Strahldichte der LED LT W5AP	153
Abb. B 5.6	LED LR W5AP - scheinbare Quelle	155
Abb. B 5.7	Relative spektrale Strahldichte der LED LR W5AP	155
Abb. B 5.8	LED LCW W5AP - scheinbare Quelle	157
Abb. B 5.9	Relative spektrale Strahldichte der LED LCW W5AP	157
Abb. B 5.10	LED LUW W5AP - scheinbare Quelle	159
Abb. B 5.11	Relative spektrale Strahldichte der LED LUW W5AP	159
Abb. B 5.12	LED LW W5AP - scheinbare Quelle	161
Abb. B 5.13	Relative spektrale Strahldichte der LED LW W5AP	161
Abb. B 6.1	Eine Oslux-LED LW F65G (OSRAM)	163
Abb. B 6.2	LED LW F65G - scheinbare Quelle	163
Abb. B 6.3	Relative spektrale Strahldichte der LED LW F65G	164
Abb. B 7.1	Eine LED des Typs ELS (Roithner)	165

Abb. B 7.2	LED ELS blau - scheinbare Quelle	165
Abb. B 7.3	Relative spektrale Strahldichte der LED ELS blau	166
Abb. B 7.4	LED ELS grün - scheinbare Quelle	167
Abb. B 7.5	Relative spektrale Strahldichte der LED ELS grün	167
Abb. B 7.6	LED ELS amber - scheinbare Quelle	169
Abb. B 7.7	Relative spektrale Strahldichte der LED ELS amber	169
Abb. B 8.1	Eine LED des Typs HP 803 (Roithner)	171
Abb. B 8.2	LED HP 803 NB - scheinbare Quelle	171
Abb. B 8.3	Relative spektrale Strahldichte der LED HP 803 NB	172
Abb. B 8.4	LED HP 803 NR - scheinbare Quelle	173
Abb. B 8.5	Relative spektrale Strahldichte der LED HP 803 NR	173
Abb. B 9.1	Eine LED W724C0 (Seoul)	175
Abb. B 9.2	LED W724C0 - scheinbare Quelle	175
Abb. B 9.3	Relative spektrale Strahldichte der LED W724C0	176
Abb. B 10.1	LED-Taschenlampe Lenser T7 (Zweibrüder)	178
Abb. B 10.2	LED-Taschenlampe Lenser T7 - scheinbare Quelle	178
Abb. B 10.3	Relative spektrale Strahldichte der LED-Taschenlampe Lenser T7	179
Abb. B 10.4	LED-Taschenlampe Lenser X21 (Zweibrüder)	180
Abb. B 10.5	LED-Taschenlampe Lenser X21 - scheinbare Quelle	180
Abb. B 10.6	Relative spektrale Strahldichte der LED-Taschenlampe Lenser X21	181
Abb. B 10.7	LED-Taschenlampe Lenser v^2 (Zweibrüder)	182
Abb. B 10.8	LED-Taschenlampe Lenser v^2 - scheinbare Quelle	182
Abb. B 10.9	Relative spektrale Strahldichte der LED-Taschenlampe Lenser v^2	183
Abb. B 11.1	Eine LED-Lampe des Typs MR-16 der Firma Omnilux	184

Abb. B 11.2	Omnilux-Lampe MR-16 blau - scheinbare Quelle	184
Abb. B 11.3	Relative spektrale Strahldichte der Omnilux-Lampe MR-16 blau	185
Abb. B 11.4	Omnilux-Lampe MR-16 gelb - scheinbare Quelle	186
Abb. B 11.5	Relative spektrale Strahldichte der Omnilux-Lampe MR-16 gelb	186
Abb. B 11.6	Omnilux-Lampe MR-16 grün - scheinbare Quelle	188
Abb. B 11.7	Relative spektrale Strahldichte der Omnilux-Lampe MR-16 grün	188
Abb. B 11.8	Omnilux-Lampe MR-16 rot - scheinbare Quelle	190
Abb. B 11.9	Relative spektrale Strahldichte der Omnilux-Lampe MR-16 rot	190
Abb. B 11.10	Omnilux-Lampe MR-16 warmweiß - scheinbare Quelle	192
Abb. B 11.11	Relative spektrale Strahldichte der Omnilux-Lampe MR-16 warmweiß	192
Abb. B 12.1	Ein LED-Reflektor des Typs 280.53 (Paulmann)	194
Abb. B 12.2	LED-Reflektor des Typs 280.53 - scheinbare Quelle	194
Abb. B 12.3	Relative spektrale Strahldichte des LED-Reflektors 280.53	195

Danksagung

Für viele hilfreiche Diskussionen und Verbesserungsvorschläge bei der Erstellung des Berichtes bedanken sich die Autoren bei Herrn Dr. Erik Romanus. Unser Dank gilt ebenfalls Herrn Felix Benndorf für die sehr sorgfältige Anfertigung der Zeichnungen und Grafiken.

Anhang A: Messung der Quellengröße

Unter Verwendung eines Kamerasystems wird ein Bild von der LED aufgenommen und mit der Software *Capture* der Firma PixeLINK eine Helligkeitsverteilung erstellt. Dabei wird jedem einzelnen Pixel entsprechend seiner Helligkeit ein Wert von 0 bis 255 zugewiesen (8-bit-Darstellung). Die Software liefert ein Histogramm der Helligkeitswerte des aufgenommenen Bildes (Abbildung A 1 a). Zur Ermittlung der scheinbaren Quellengröße einer LED sind nach Vorgabe der Lampensicherheitsnorm DIN EN 62471 50 % des maximalen Helligkeitswertes zu berücksichtigen (Abbildung A 1 b). Die daraus neu entstandene Fläche bestimmt die Größe der scheinbaren Quelle.

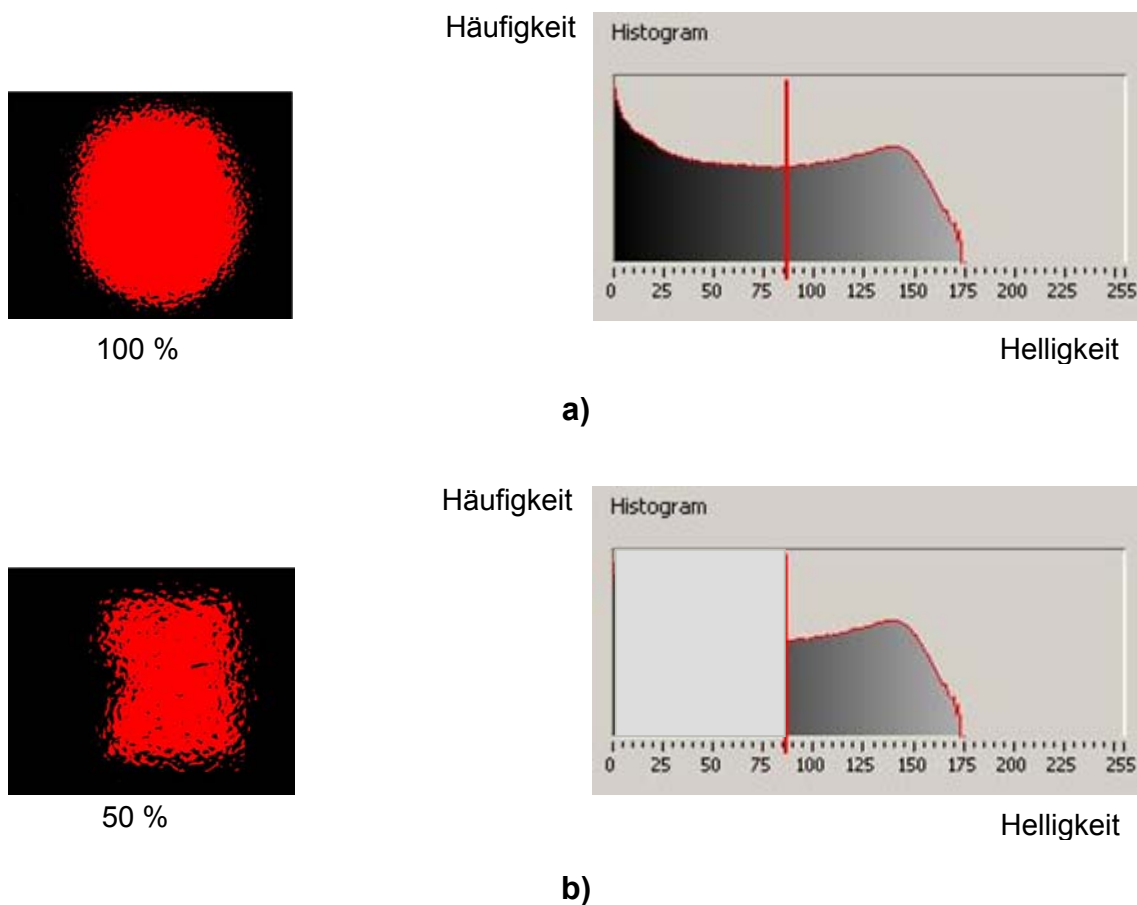
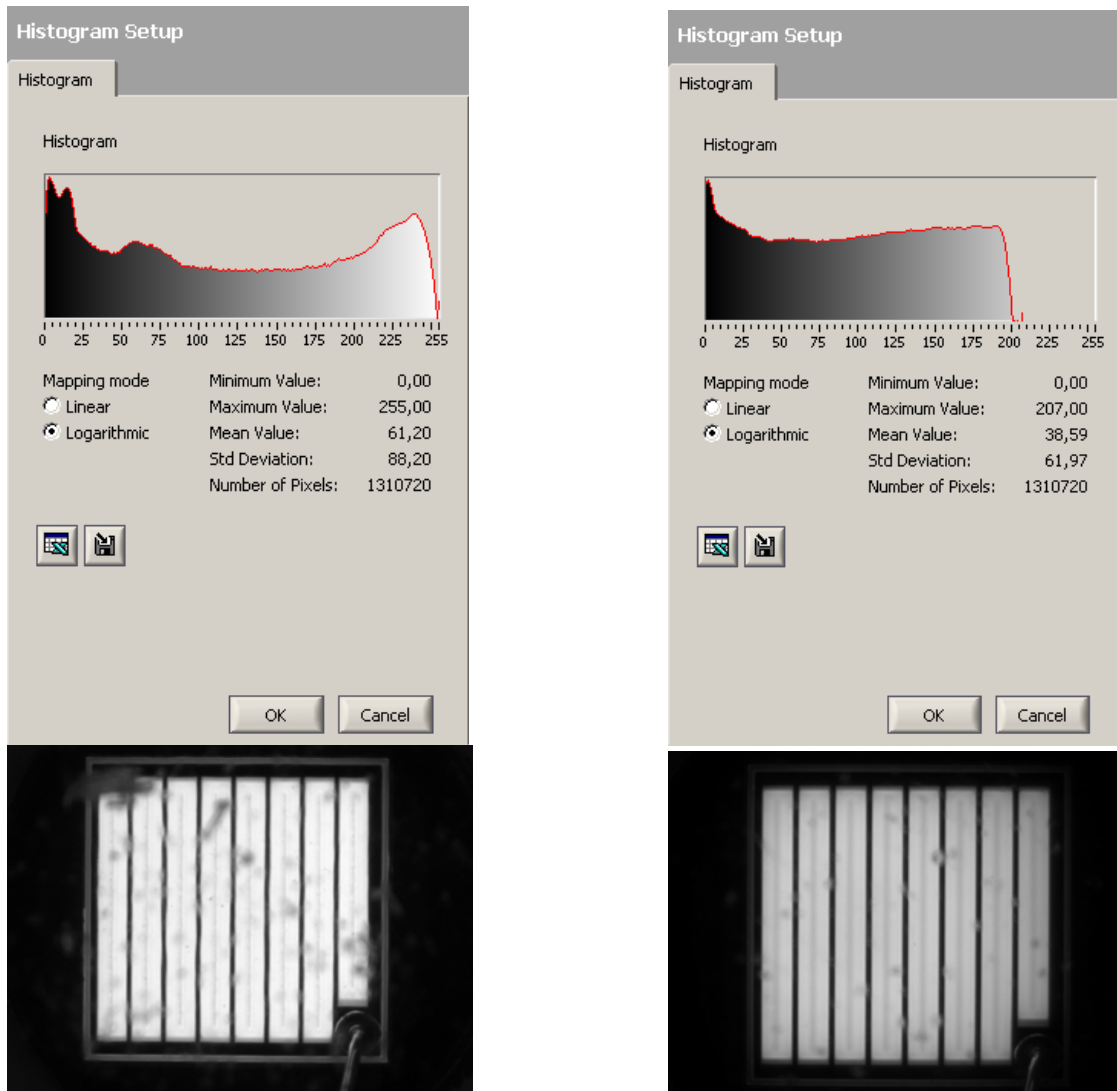


Abb. A 1 Zur Bestimmung der Quellengröße: Ein Histogramm zeigt die Häufigkeit der Punkte mit bestimmter Helligkeit:
 a) 100 % des maximalen Helligkeitswertes
 b) 50 % des maximalen Helligkeitswertes

Die LED sollen nicht mit der maximal zulässigen Stromstärke betrieben werden, da die Kameraaufnahme übersteuert und der 50%-Schwellwert nicht korrekt ermittelt werden kann. Ein Beispiel zeigt Abbildung A 2 a. Die Stromstärke ist hier zu hoch gewählt, die Aufnahme zu hell (Peak beim Helligkeitswert 255). Die Abbildung A 2 b zeigt die gleiche LED ohne Übersteuerung (kein Peak beim Helligkeitswert 255).



a)

b)

Abb. A 2 Aufnahme einer LED mit dazugehörigem Histogramm:
a) mit Übersteuerung, b) ohne Übersteuerung

Vor jeder Bestimmung der scheinbaren Quellengröße wird das Messsystem mit einem Normraster kalibriert. Dazu dient eine auf Glas aufgedampfte Punktmatrix (Punktdurchmesser 0,0625 mm, Abstand der Mittelpunkte zueinander 0,125 mm) (Abbildung A 3).

Anhand der nach Berücksichtigung von 50 % des maximalen Helligkeitswertes neu entstandenen Fläche wird die Größe der scheinbaren Quelle d bestimmt (Abbildung A 4). Dazu wird die Software *Assistant* von National Instruments Vision verwendet.

Die Winkelausdehnung α der scheinbaren Quelle wird durch Division der gemessenen Größe der scheinbaren Quelle d durch den Messabstand $r = 20$ cm berechnet (Formel (4.1)).

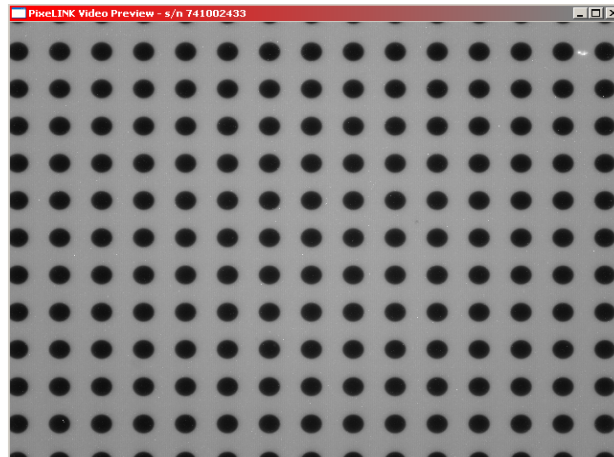


Abb. A 3 Zur Raster-Kalibrierung

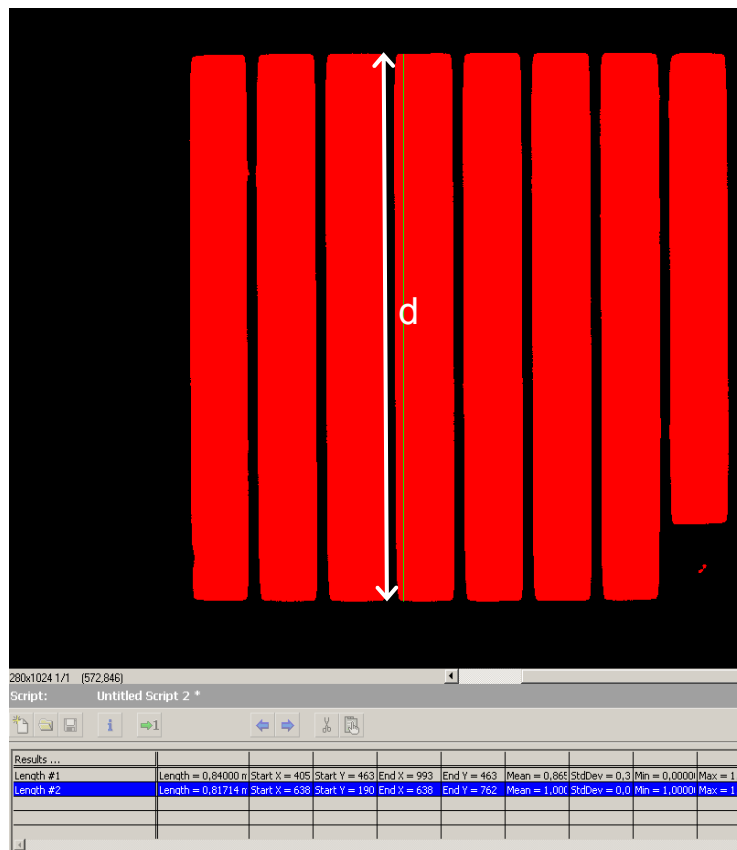


Abb. A 4 Messung der scheinbaren Quellengröße

Anhang B: Messergebnisse untersuchter LED

In diesem Anhang werden die Ergebnisse der Beurteilung der photobiologischen Sicherheit sämtlicher im Projekt untersuchter LED, LED-Taschenlampen, LED-Lampen und eines LED-Reflektors im sichtbaren Spektralbereich nach der Lampensicherheitsnorm DIN EN 62471 dargestellt. Die LED wurden mit Stromstärken bzw. Spannungen betrieben, die den Vorgaben in den technischen Daten entsprachen. Alle Messungen wurden in einem Abstand von 20 cm durchgeführt. Fett gedruckte Messwerte in den Tabellen bedeuten eine Überschreitung der Emissionsgrenzwerte der Lampensicherheitsnorm DIN EN 62471.

B 1 LED Golden Dragon ohne Linse (OSRAM)

Die Abbildung B 1.1 zeigt eine LED des Typs Golden Dragon ohne Linse von der Firma OSRAM.



Abb. B 1.1 Eine LED des Typs Golden Dragon ohne Linse (OSRAM)

Blaulicht emittierende LED LB W5SM

Die Blaulicht emittierende LED LB W5SM wurde mit einer Stromstärke von 0,5 A betrieben. Die Beleuchtungsstärke E_v in 20 cm Entfernung beträgt 127 lx.



Abb. B 1.2 LED LB W5SM - scheinbare Quelle

Größe der scheinbaren Quelle $d = 0,9 \text{ mm}$
 Winkelausdehnung der scheinbaren Quelle $\alpha = 4,5 \text{ mrad}$

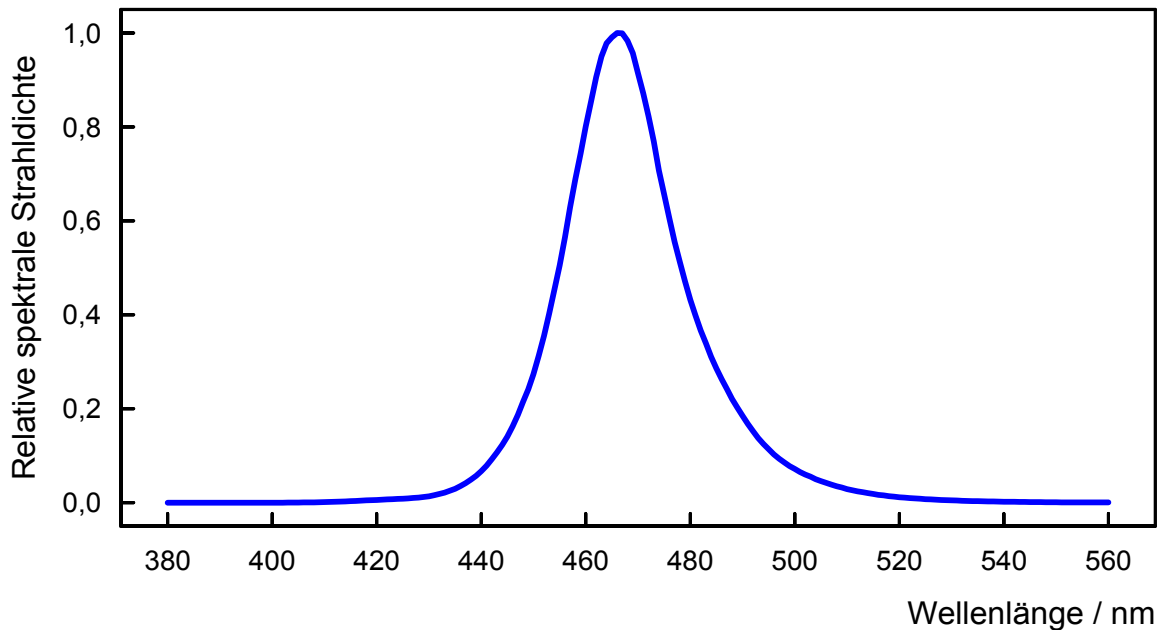


Abb. B 1.3 Relative spektrale Strahlidichte der LED LB W5SM

Tab. B 1.1 Messwerte der effektiven Strahlidichte $(L_B)_{\text{mess}}$ für die photochemische und $(L_R)_{\text{mess}}$ für die thermische Netzhautgefährdung der LED LB W5SM sowie die dazugehörigen Emissionsgrenzwerte nach der Lampensicherheitsnorm

Gefährdung	Effektive Strahlidichte/ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$	Freie Gruppe	Risiko- gruppe 1	Risiko- gruppe 2
Netzhaut photochemisch	Messwert $(L_B)_{\text{mess}}$	257	9 851	44 053
	Emissionsgrenzwert L_B'	100	10 000	4 000 000
Netzhaut thermisch	Messwert $(L_R)_{\text{mess}}$	16 154	16 154	68 478
	Emissionsgrenzwert L_R'	6 222 222	6 222 222	15 777 778

Fazit:

Photochemische Netzhautgefährdung: ja
 Thermische Netzhautgefährdung: nein
 Einstufung: Risikogruppe 1
 Maximal zulässige Expositionsdauer t_{max} : 102 s

Weißlicht emittierende LED LCW W5SM (warmweiß)

Die Farbtemperatur der Weißlicht emittierenden LED LCW W5SM beträgt laut Herstellerangaben 2 500 - 4 800 K. Die LED wurde mit einer Stromstärke von 1,0 A betrieben. In einer Entfernung von 20 cm wurde die Beleuchtungsstärke E_v von 430 lx gemessen.

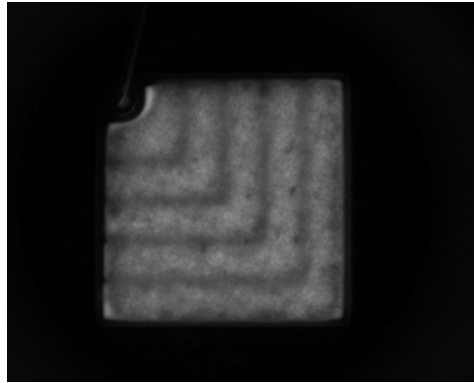


Abb. B 1.4 LED LCW W5SM - scheinbare Quelle

Größe der scheinbaren Quelle $d = 0,9 \text{ mm}$
 Winkelausdehnung der scheinbaren Quelle $\alpha = 4,5 \text{ mrad}$

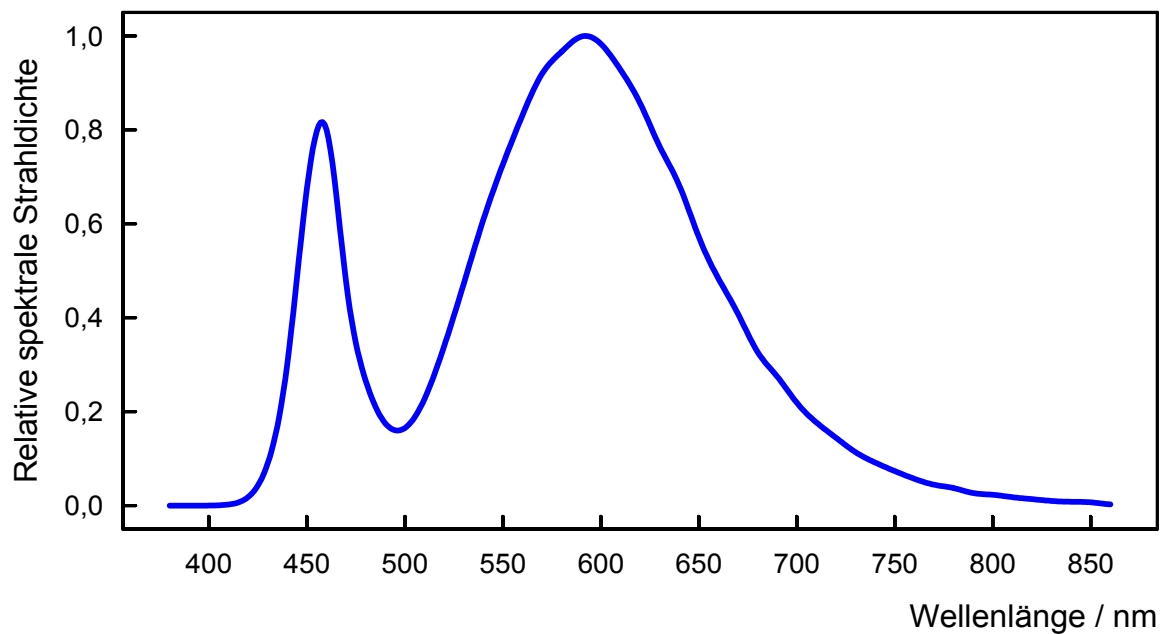


Abb. B 1.5 Relative spektrale Strahlidichte der LED LCW W5SM

Tab. B 1.2 Messwerte der effektiven Strahldichte $(L_B)_{\text{mess}}$ für die photochemische und $(L_R)_{\text{mess}}$ für die thermische Netzhautgefährdung der LED LCW W5SM sowie die dazugehörigen Emissionsgrenzwerte nach der Lampensicherheitsnorm

Gefährdung	Effektive Strahldichte/ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$	Freie Gruppe	Risiko- gruppe 1	Risiko- gruppe 2
Netzhaut photochemisch	Messwert $(L_B)_{\text{mess}}$	63	2 356	10 129
	Emissionsgrenzwert L_B'	100	10 000	4 000 000
Netzhaut thermisch	Messwert $(L_R)_{\text{mess}}$	17 295	17 295	66 872
	Emissionsgrenzwert L_R'	6 222 222	6 222 222	15 777 778

Fazit:

Photochemische Netzhautgefährdung: nein
 Thermische Netzhautgefährdung: nein
 Einstufung: Freie Gruppe

Weißlicht emittierende LED LUW W5SM (kaltweiß)

Die Farbtemperatur der Weißlicht emittierenden LED LUW W5SM beträgt 6 500 K. Die LED wurde mit einer Stromstärke von 1,0 A betrieben. Die Beleuchtungsstärke E_v in 20 cm Entfernung beträgt 1 333 lx.

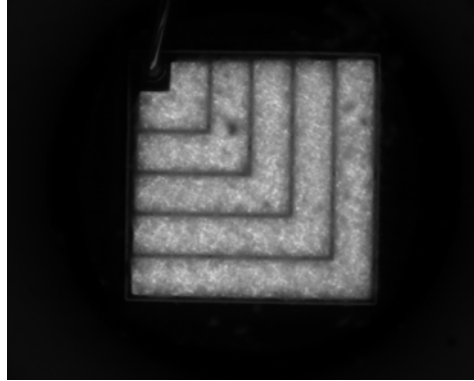


Abb. B 1.6 LED LUW W5SM - scheinbare Quelle

Größe der scheinbaren Quelle $d = 0,9 \text{ mm}$
 Winkelausdehnung der scheinbaren Quelle $\alpha = 4,5 \text{ mrad}$

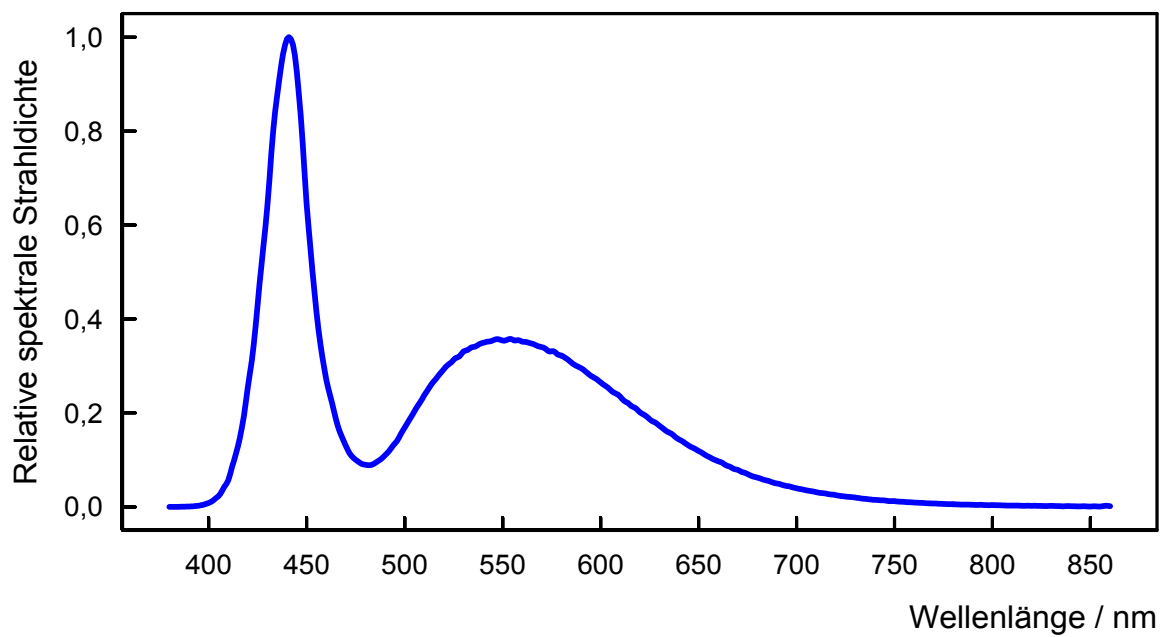


Abb. B 1.7 Relative spektrale Strahlidichte der LED LUW W5SM

Tab. B 1.3 Messwerte der effektiven Strahldichte $(L_B)_{\text{mess}}$ für die photochemische und $(L_R)_{\text{mess}}$ für die thermische Netzhautgefährdung der LED LUW W5SM sowie die dazugehörigen Emissionsgrenzwerte nach der Lampensicherheitsnorm

Gefährdung	Effektive Strahldichte/ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$	Freie Gruppe	Risiko- gruppe 1	Risiko- gruppe 2
Netzhaut photochemisch	Messwert $(L_B)_{\text{mess}}$	381	14 474	68 529
	Emissionsgrenzwert L_B'	100	10 000	4 000 000
Netzhaut thermisch	Messwert $(L_R)_{\text{mess}}$	37 908	37 908	167 928
	Emissionsgrenzwert L_R'	6 222 222	6 222 222	15 777 778

Fazit:

Photochemische Netzhautgefährdung: ja
 Thermische Netzhautgefährdung: nein
 Einstufung: Risikogruppe 2
 Maximal zulässige Expositionsdauer t_{max} : 15 s

Weißlicht emittierende LED ZW W5SG (kaltweiß)

Die Farbtemperatur der Weißlicht emittierenden LED ZW W5SG beträgt 5 600 K. Die LED wurde mit einer Stromstärke von 0,5 A betrieben. Die Beleuchtungsstärke E_v in 20 cm Entfernung beträgt 501 lx.

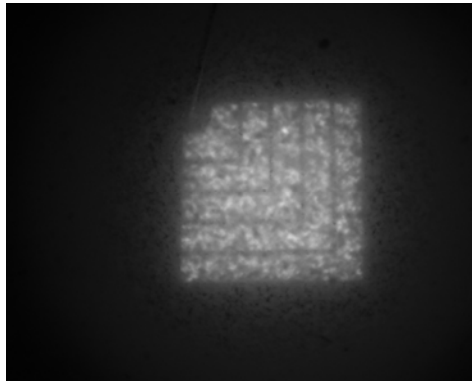


Abb. B 1.8 LED ZW W5SG - scheinbare Quelle

Größe der scheinbaren Quelle $d = 0,9 \text{ mm}$
 Winkelausdehnung der scheinbaren Quelle $\alpha = 4,5 \text{ mrad}$

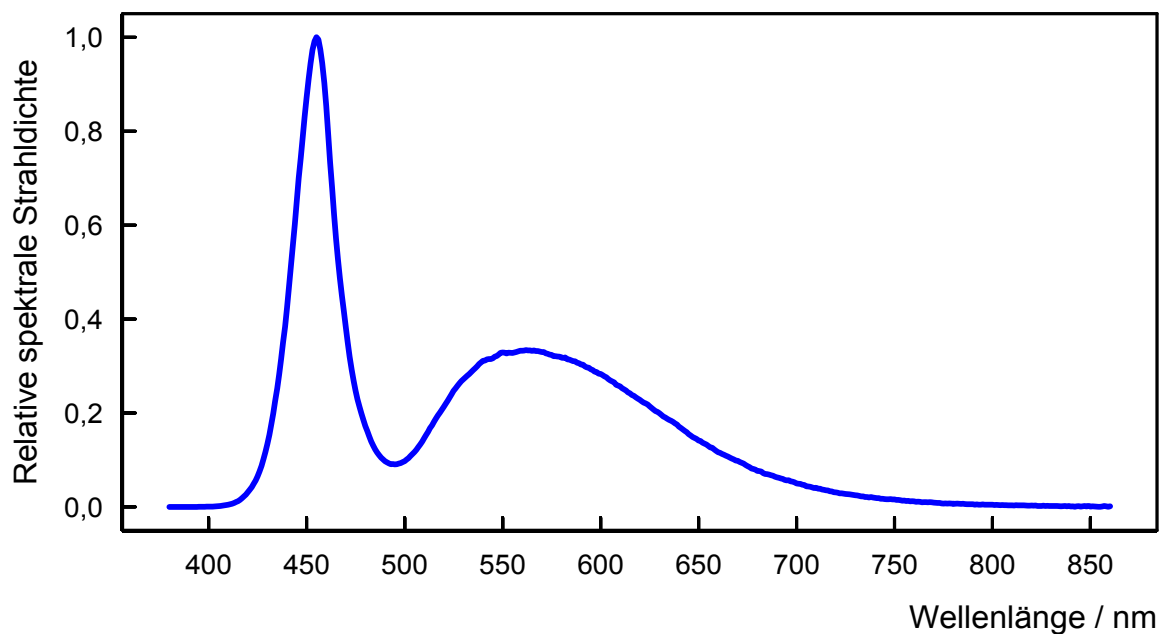


Abb. B 1.9 Relative spektrale Strahlidichte der LED ZW W5SG

Tab. B 1.4 Messwerte der effektiven Strahldichte $(L_B)_{\text{mess}}$ für die photochemische und $(L_R)_{\text{mess}}$ für die thermische Netzhautgefährdung der LED ZW W5SG sowie die dazugehörigen Emissionsgrenzwerte nach der Lampensicherheitsnorm

Gefährdung	Effektive Strahldichte/ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$	Freie Gruppe	Risiko- gruppe 1	Risiko- gruppe 2
Netzhaut photochemisch	Messwert $(L_B)_{\text{mess}}$	113	4 897	23 999
	Emissionsgrenzwert L_B'	100	10 000	4 000 000
Netzhaut thermisch	Messwert $(L_R)_{\text{mess}}$	14 786	14 786	53 463
	Emissionsgrenzwert L_R'	6 222 222	6 222 222	15 777 778

Fazit:

Photochemische Netzhautgefährdung: ja
 Thermische Netzhautgefährdung: nein
 Einstufung: Risikogruppe 1
 Maximal zulässige Expositionsdauer t_{max} : 204 s

B 2 LED Golden Dragon mit Linse (OSRAM)

Die Abbildung B 2.1 zeigt eine LED des Typs Golden Dragon mit Linse der Firma OSRAM. Diese LED wurden mit einer Stromstärke von 0,4 A betrieben.



Abb. B 2.1 Eine LED des Typs Golden Dragon mit Linse (OSRAM)

Weißlicht emittierende LED LCW W51M (warmweiß)

Die Farbtemperatur der Weißlicht emittierenden LED LCW W51M beträgt laut Herstellerangaben 2 500 - 4 800 K. In 20 cm Entfernung von der LED wurde die Beleuchtungsstärke E_v von 3 506 lx gemessen.

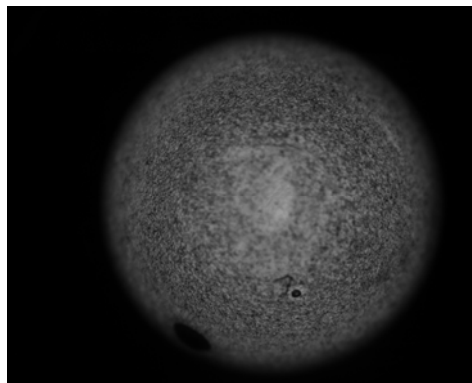


Abb. B 2.2 LED LCW W51M - scheinbare Quelle

Größe der scheinbaren Quelle	$d = 4,3 \text{ mm}$
Winkelausdehnung der scheinbaren Quelle	$\alpha = 21,5 \text{ mrad}$

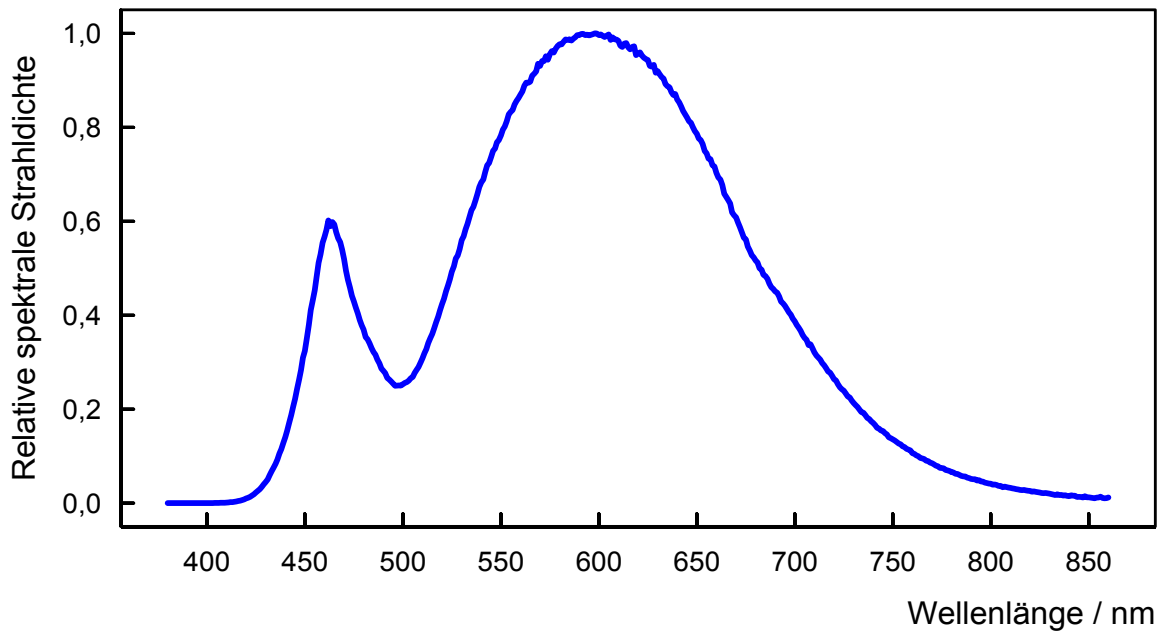


Abb. B 2.3 Relative spektrale Strahlidichte der LED LCW W51M

Tab. B 2.1 Messwerte der effektiven Strahlidichte $(L_B)_{\text{mess}}$ für die photochemische und $(L_R)_{\text{mess}}$ für die thermische Netzhautgefährdung der LED LCW W51M sowie die dazugehörigen Emissionsgrenzwerte nach der Lampensicherheitsnorm

Gefährdung	Effektive Strahlidichte/ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$	Freie Gruppe	Risiko- gruppe 1	Risiko- gruppe 2
Netzhaut photochemisch	Messwert $(L_B)_{\text{mess}}$	208	2 967	4 432
	Emissionsgrenzwert L_B'	100	10 000	4 000 000
Netzhaut thermisch	Messwert $(L_R)_{\text{mess}}$	31 407	31 407	42 838
	Emissionsgrenzwert L_R'	1 302 326	1 302 326	3 302 326

Fazit:

Photochemische Netzhautgefährdung: ja
 Thermische Netzhautgefährdung: nein
 Einstufung: Risikogruppe 1
 Maximal zulässige Expositionsdauer t_{max} : 337 s

Weißlicht emittierende LED LCW W55M (warmweiß)

Die Farbtemperatur der Weißlicht emittierenden LED LCW W55M beträgt laut Herstellerangaben 2 500 - 4 800 K. Die Beleuchtungsstärke E_v in 20 cm Entfernung beträgt 1 525 lx.

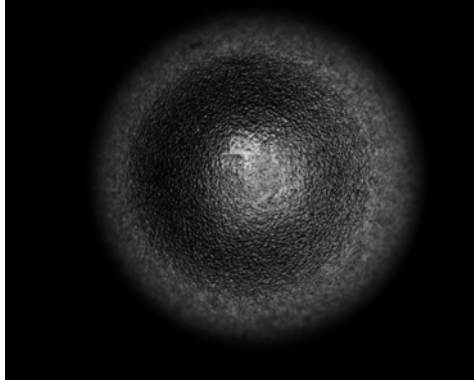


Abb. B 2.4 LED LCW W55M - scheinbare Quelle

Größe der scheinbaren Quelle $d = 3,9 \text{ mm}$
 Winkelausdehnung der scheinbaren Quelle $\alpha = 19,5 \text{ mrad}$

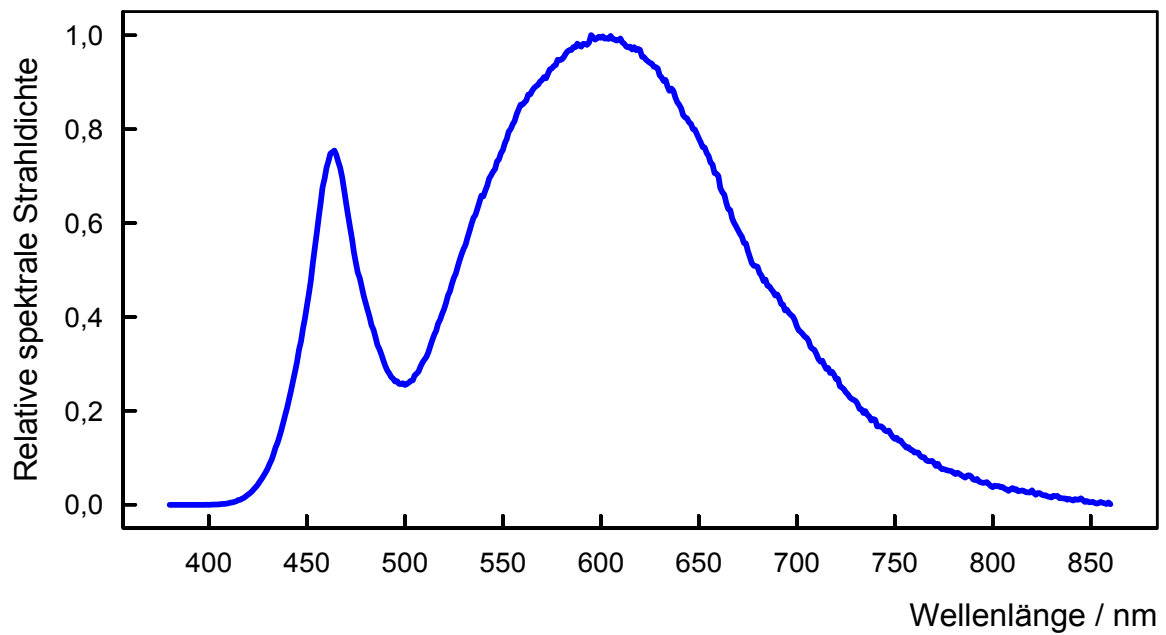


Abb. B 2.5 Relative spektrale Strahlendichte der LED LCW W55M

Tab. B 2.2 Messwerte der effektiven Strahldichte $(L_B)_{\text{mess}}$ für die photochemische und $(L_R)_{\text{mess}}$ für die thermische Netzhautgefährdung der LED LCW W55M sowie die dazugehörigen Emissionsgrenzwerte nach der Lampensicherheitsnorm

Gefährdung	Effektive Strahldichte/ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$	Freie Gruppe	Risiko- gruppe 1	Risiko- gruppe 2
Netzhaut photochemisch	Messwert $(L_B)_{\text{mess}}$	168	2 210	3 484
	Emissionsgrenzwert L_B'	100	10 000	4 000 000
Netzhaut thermisch	Messwert $(L_R)_{\text{mess}}$	15 723	15 723	32 356
	Emissionsgrenzwert L_R'	1 435 897	1 435 897	3 641 026

Fazit:

Photochemische Netzhautgefährdung: ja
 Thermische Netzhautgefährdung: nein
 Einstufung: Risikogruppe 1
 Maximal zulässige Expositionsdauer t_{max} : 452 s

Weißlicht emittierende LED LW W51M (kaltweiß)

Die Farbtemperatur der Weißlicht emittierenden LED LW W51M beträgt 5 600 K. Die Beleuchtungsstärke E_v in 20 cm Entfernung beträgt 4 667 lx.

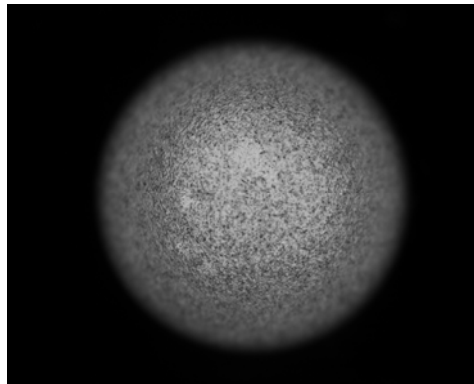


Abb. B 2.6 LED LW W51M - scheinbare Quelle

Größe der scheinbaren Quelle $d = 4,2 \text{ mm}$
 Winkelausdehnung der scheinbaren Quelle $\alpha = 21,0 \text{ mrad}$

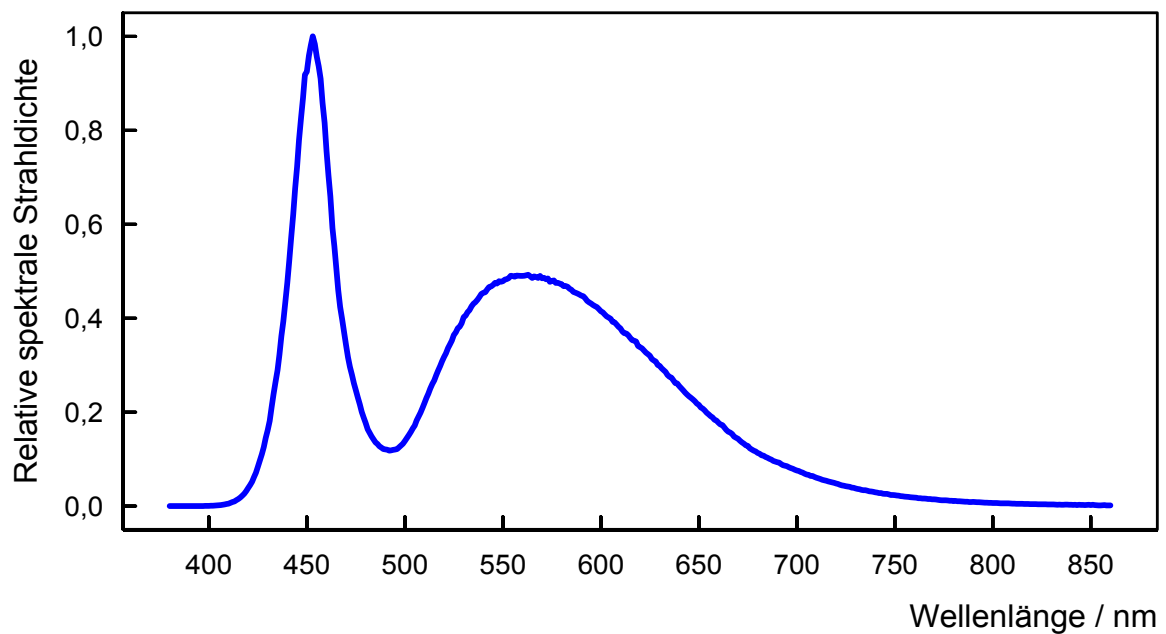


Abb. B 2.7 Relative spektrale Strahlidichte der LED LW W51M

Tab. B 2.3 Messwerte der effektiven Strahldichte $(L_B)_{\text{mess}}$ für die photochemische und $(L_R)_{\text{mess}}$ für die thermische Netzhautgefährdung der LED LW W51M sowie die dazugehörigen Emissionsgrenzwerte nach der Lampensicherheitsnorm

Gefährdung	Effektive Strahldichte/ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$	Freie Gruppe	Risiko- gruppe 1	Risiko- gruppe 2
Netzhaut photochemisch	Messwert $(L_B)_{\text{mess}}$	860	11 691	16 289
	Emissionsgrenzwert L_B'	100	10 000	4 000 000
Netzhaut thermisch	Messwert $(L_R)_{\text{mess}}$	41 805	41 805	55 841
	Emissionsgrenzwert L_R'	1 333 333	1 333 333	3 380 952

Fazit:

Photochemische Netzhautgefährdung: ja
 Thermische Netzhautgefährdung: nein
 Einstufung: Risikogruppe 2
 Maximal zulässige Expositionsdauer t_{max} : 61 s

Weißlicht emittierende LED LW W55M (kaltweiß)

Die Farbtemperatur der Weißlicht emittierenden LED LW W55M beträgt 5 600 K. In 20 cm Entfernung von der LED wurde die Beleuchtungsstärke E_v von 1 561 lx gemessen.

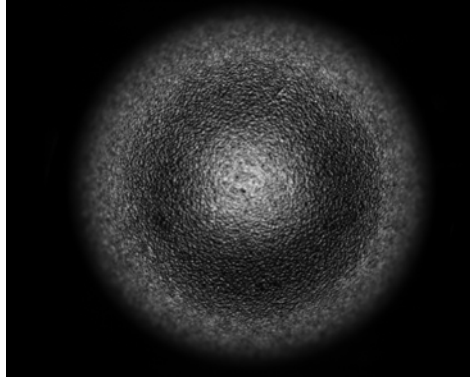


Abb. B 2.8 LED LW W55M - scheinbare Quelle

Größe der scheinbaren Quelle $d = 4,0 \text{ mm}$
 Winkelausdehnung der scheinbaren Quelle $\alpha = 20,0 \text{ mrad}$

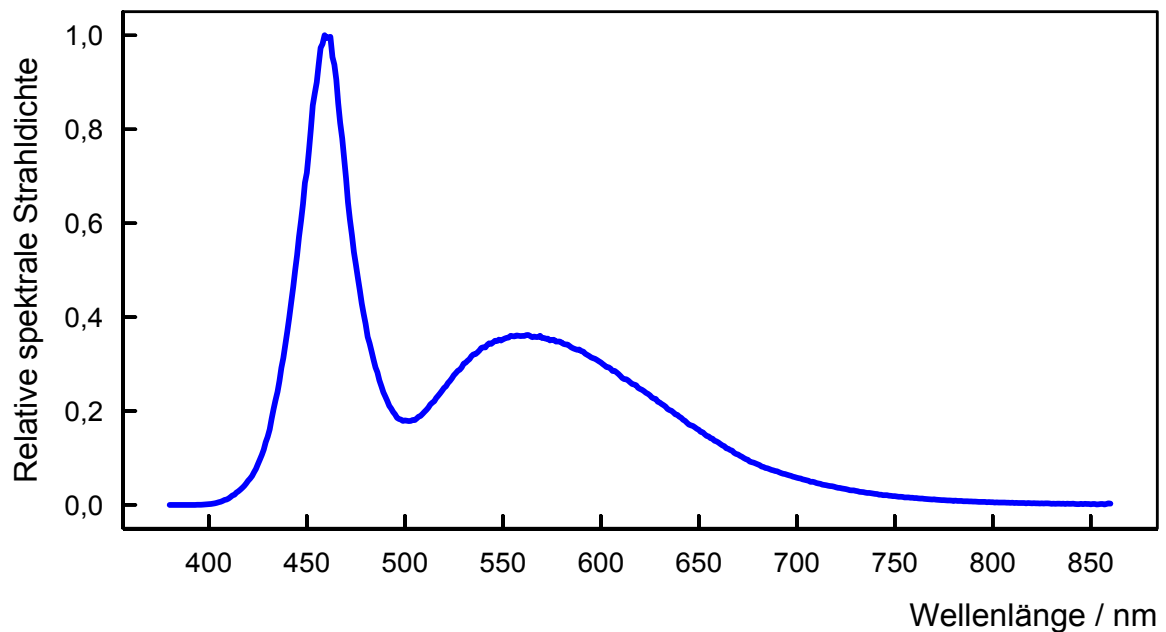


Abb. B 2.9 Relative spektrale Strahlidichte der LED LW W55M

Tab. B 2.4 Messwerte der effektiven Strahldichte $(L_B)_{\text{mess}}$ für die photochemische und $(L_R)_{\text{mess}}$ für die thermische Netzhautgefährdung der LED LW W55M sowie die dazugehörigen Emissionsgrenzwerte nach der Lampensicherheitsnorm

Gefährdung	Effektive Strahldichte/ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$	Freie Gruppe	Risiko- gruppe 1	Risiko- gruppe 2
Netzhaut photochemisch	Messwert $(L_B)_{\text{mess}}$	410	5 933	10 011
	Emissionsgrenzwert L_B'	100	10 000	4 000 000
Netzhaut thermisch	Messwert $(L_R)_{\text{mess}}$	18 292	18 292	32 175
	Emissionsgrenzwert L_R'	1 400 000	1 400 000	3 550 000

Fazit:

Photochemische Netzhautgefährdung: ja
 Thermische Netzhautgefährdung: nein
 Einstufung: Risikogruppe 1
 Maximal zulässige Expositionsdauer t_{max} : 169 s

Weißlicht emittierende LED LUW W5KM (kaltweiß)

Die Farbtemperatur der Weißlicht emittierenden LED LUW W5KM beträgt 6 500 K.
Die Beleuchtungsstärke E_v in 20 cm Entfernung beträgt 187 lx.

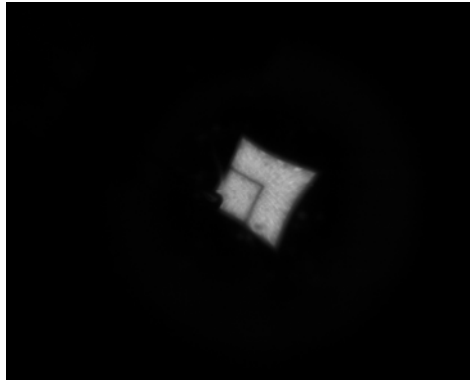


Abb. B 2.10 LED LUW W5KM - scheinbare Quelle

Größe der scheinbaren Quelle $d = 0,4 \text{ mm}$
Winkelausdehnung der scheinbaren Quelle $\alpha = 2,0 \text{ mrad}$

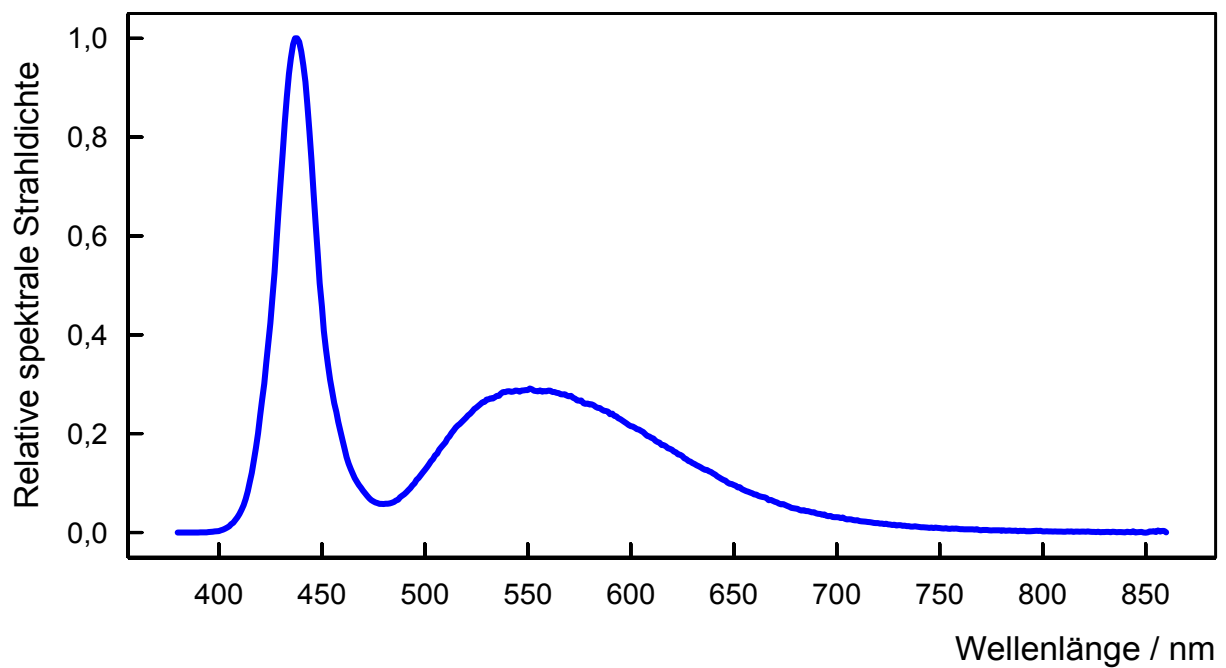


Abb. B 2.11 Relative spektrale Strahlidichte der LED LUW W5KM

Tab. B 2.5 Messwerte der effektiven Strahldichte $(L_B)_{\text{mess}}$ für die photochemische und $(L_R)_{\text{mess}}$ für die thermische Netzhautgefährdung der LED LUW W5KM sowie die dazugehörigen Emissionsgrenzwerte nach der Lampensicherheitsnorm

Gefährdung	Effektive Strahldichte/ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$	Freie Gruppe	Risiko- gruppe 1	Risiko- gruppe 2
Netzhaut photochemisch	Messwert $(L_B)_{\text{mess}}$	57	1 923	25 413
	Emissionsgrenzwert L_B'	100	10 000	4 000 000
Netzhaut thermisch	Messwert $(L_R)_{\text{mess}}$	4 820	4 820	62 323
	Emissionsgrenzwert L_R'	14 000 000	14 000 000	35 500 000

Fazit:

Photochemische Netzhautgefährdung: nein
 Thermische Netzhautgefährdung: nein
 Einstufung: Freie Gruppe

B 3 LED Golden Dragon Plus (OSRAM)

Die Abbildung B 3.1 zeigt eine LED des Typs Golden Dragon Plus von der Firma OSRAM. Diese LED wurden mit einer Stromstärke von 1,0 A betrieben.



Abb. B 3.1 Eine LED des Typs Golden Dragon Plus (OSRAM)

LED LA W5AM (amber)

In 20 cm Entfernung von der LED wurde die Beleuchtungsstärke E_v von 807 lx gemessen.



Abb. B 3.2 LED LA W5AM - scheinbare Quelle

Größe der scheinbaren Quelle	$d = 0,9 \text{ mm}$
Winkelausdehnung der scheinbaren Quelle	$\alpha = 4,5 \text{ mrad}$

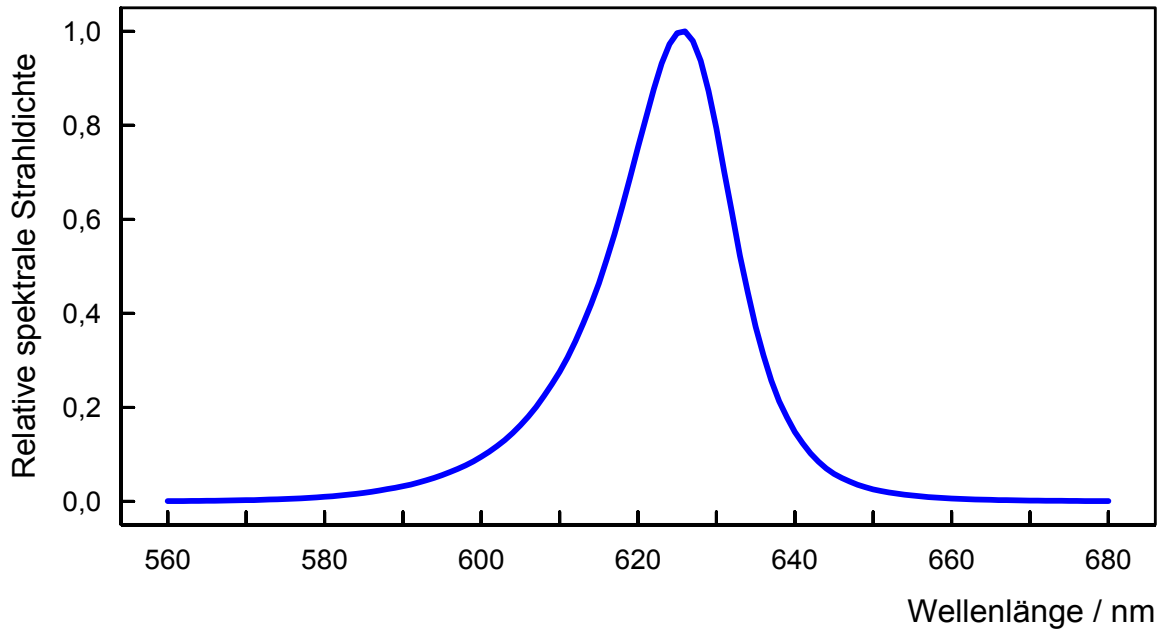


Abb. B 3.3 Relative spektrale Strahlidichte der LED LA W5AM

Tab. B 3.1 Messwerte der effektiven Strahlidichte $(L_B)_{\text{mess}}$ für die photochemische und $(L_R)_{\text{mess}}$ für die thermische Netzhautgefährdung der LED LA W5AM sowie die dazugehörigen Emissionsgrenzwerte nach der Lampensicherheitsnorm

Gefährdung	Effektive Strahlidichte/ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$	Freie Gruppe	Risiko- gruppe 1	Risiko- gruppe 2
Netzhaut photochemisch	Messwert $(L_B)_{\text{mess}}$	0	2	7
	Emissionsgrenzwert L_B'	100	10 000	4 000 000
Netzhaut thermisch	Messwert $(L_R)_{\text{mess}}$	25 897	25 897	119 602
	Emissionsgrenzwert L_R'	6 222 222	6 222 222	15 777 778

Fazit:

Photochemische Netzhautgefährdung: nein
 Thermische Netzhautgefährdung: nein
 Einstufung: Freie Gruppe

Rotlicht emittierende LED LR W5AM

Die Beleuchtungsstärke E_v in 20 cm Entfernung beträgt 623 lx.



Abb. B 3.4 LED LR W5AM - scheinbare Quelle

Größe der scheinbaren Quelle $d = 0,9 \text{ mm}$
Winkelausdehnung der scheinbaren Quelle $\alpha = 4,5 \text{ mrad}$

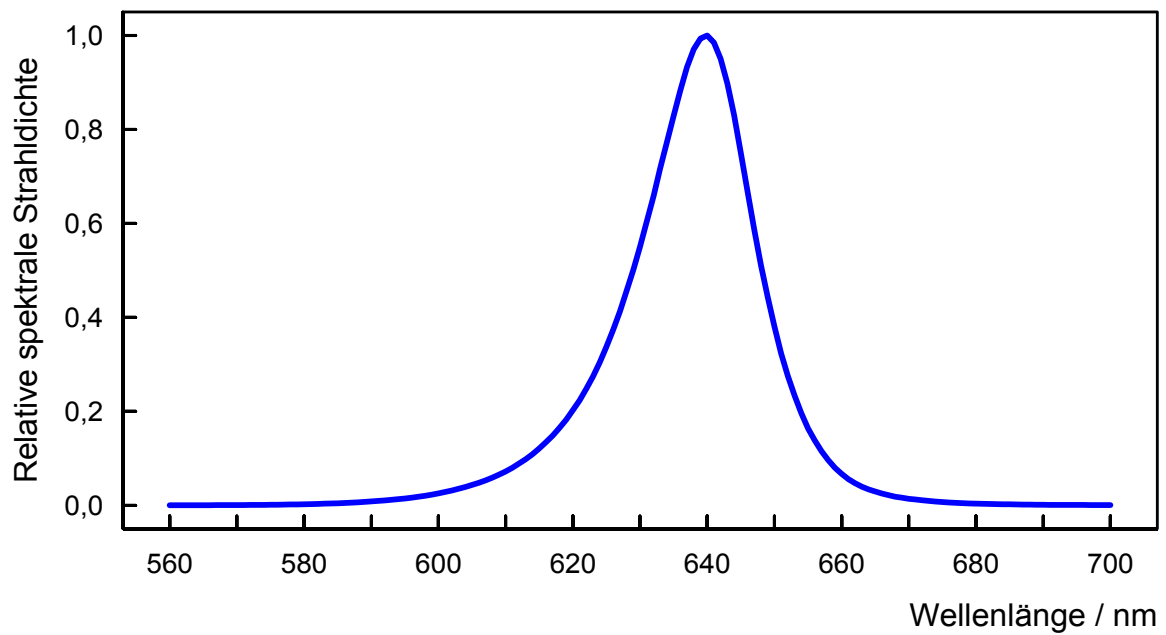


Abb. B 3.5 Relative spektrale Strahlidichte der LED LR W5AM

Tab. B 3.2 Messwerte der effektiven Strahldichte $(L_B)_{\text{mess}}$ für die photochemische und $(L_R)_{\text{mess}}$ für die thermische Netzhautgefährdung der LED LR W5AM sowie die dazugehörigen Emissionsgrenzwerte nach der Lampensicherheitsnorm

Gefährdung	Effektive Strahldichte/ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$	Freie Gruppe	Risiko- gruppe 1	Risiko- gruppe 2
Netzhaut photochemisch	Messwert $(L_B)_{\text{mess}}$	0	0	2
	Emissionsgrenzwert L_B'	100	10 000	4 000 000
Netzhaut thermisch	Messwert $(L_R)_{\text{mess}}$	33 770	33 770	150 446
	Emissionsgrenzwert L_R'	6 222 222	6 222 222	15 777 778

Fazit:

Photochemische Netzhautgefährdung: nein
 Thermische Netzhautgefährdung: nein
 Einstufung: Freie Gruppe

Gelblicht emittierende LED LY W5AM

In 20 cm Entfernung von der LED wurde die Beleuchtungsstärke E_v von 628 lx gemessen.

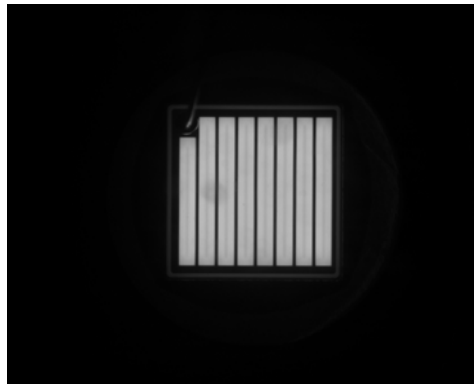


Abb. B 3.6 LED LY W5AM - scheinbare Quelle

Größe der scheinbaren Quelle $d = 0,9 \text{ mm}$
Winkelausdehnung der scheinbaren Quelle $\alpha = 4,5 \text{ mrad}$

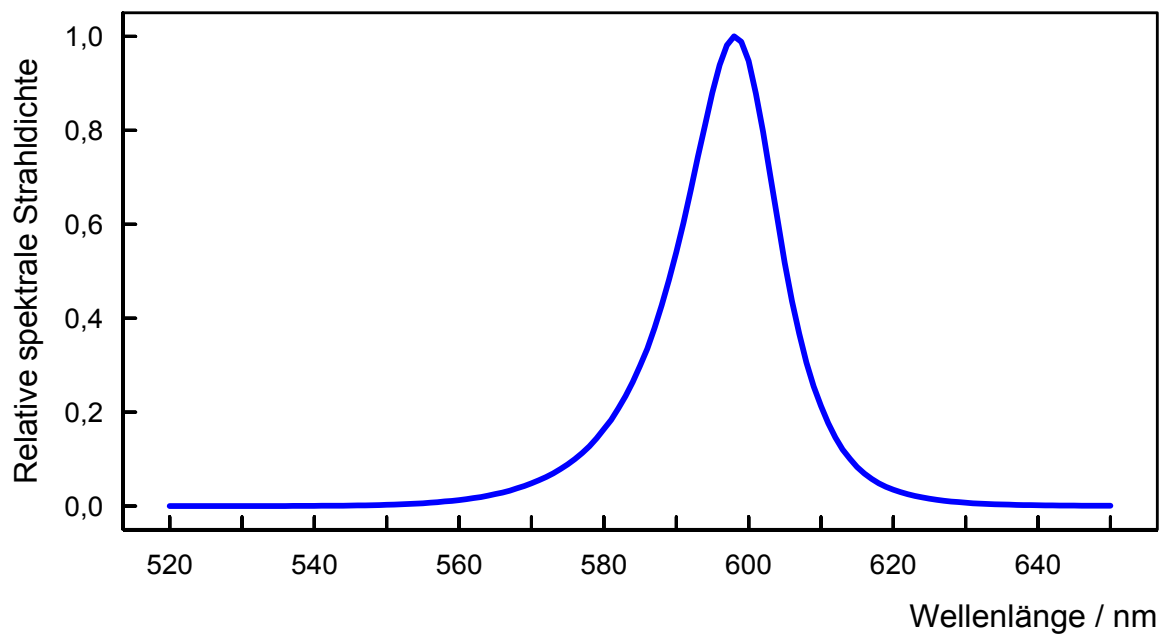


Abb. B 3.7 Relative spektrale Strahlidichte der LED LY W5AM

Tab. B 3.3 Messwerte der effektiven Strahldichte $(L_B)_{\text{mess}}$ für die photochemische und $(L_R)_{\text{mess}}$ für die thermische Netzhautgefährdung der LED LY W5AM sowie die dazugehörigen Emissionsgrenzwerte nach der Lampensicherheitsnorm

Gefährdung	Effektive Strahldichte/ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$	Freie Gruppe	Risiko- gruppe 1	Risiko- gruppe 2
Netzhaut photochemisch	Messwert $(L_B)_{\text{mess}}$	0	10	21
	Emissionsgrenzwert L_B'	100	10 000	4 000 000
Netzhaut thermisch	Messwert $(L_R)_{\text{mess}}$	9 051	9 051	26 370
	Emissionsgrenzwert L_R'	6 222 222	6 222 222	15 777 778

Fazit:

Photochemische Netzhautgefährdung: nein
 Thermische Netzhautgefährdung: nein
 Einstufung: Freie Gruppe

Weißlicht emittierende LED LW W5AM (kaltweiß)

Die Farbtemperatur der Weißlicht emittierenden LED LW W5AM beträgt 5 600 K. Die Beleuchtungsstärke E_v in 20 cm Entfernung beträgt 902 lx.

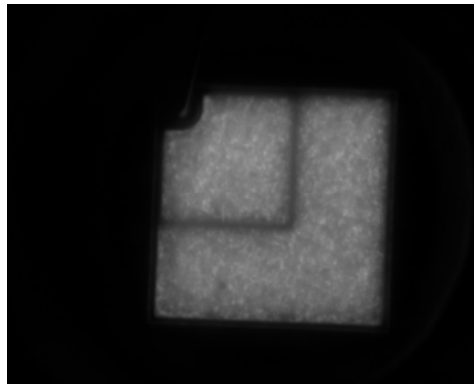


Abb. B 3.8 LED LW W5AM - scheinbare Quelle

Größe der scheinbaren Quelle $d = 1,0 \text{ mm}$
 Winkelausdehnung der scheinbaren Quelle $\alpha = 5,0 \text{ mrad}$

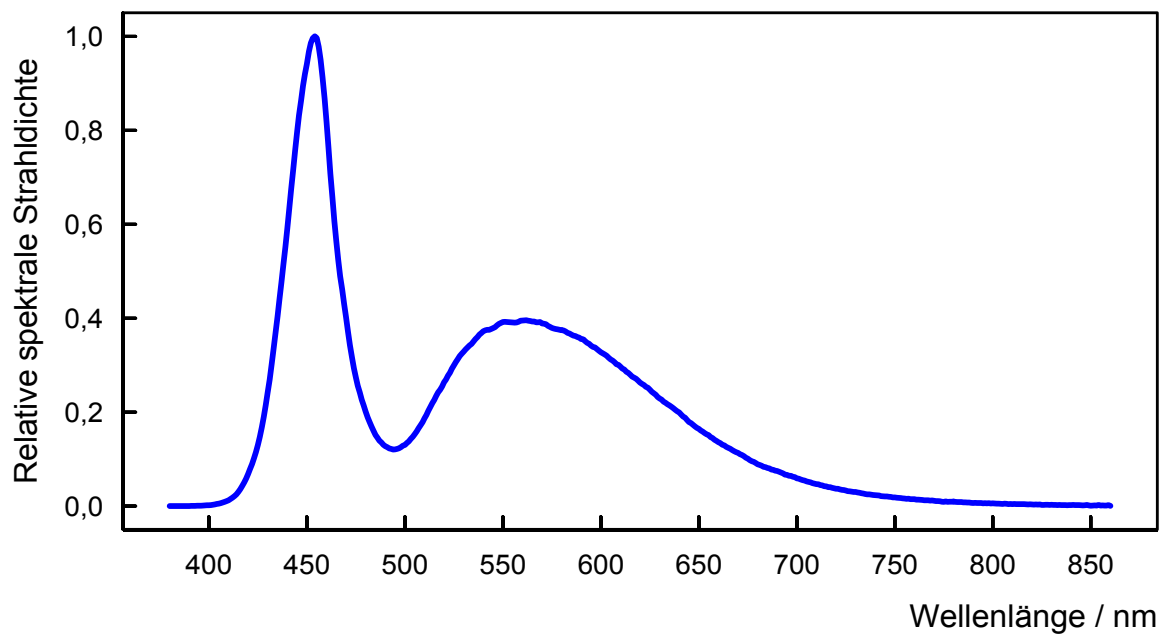


Abb. B 3.9 Relative spektrale Strahlidichte der LED LW W5AM

Tab. B 3.4 Messwerte der effektiven Strahldichte $(L_B)_{\text{mess}}$ für die photochemische und $(L_R)_{\text{mess}}$ für die thermische Netzhautgefährdung der LED LW W5AM sowie die dazugehörigen Emissionsgrenzwerte nach der Lampensicherheitsnorm

Gefährdung	Effektive Strahldichte/ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$	Freie Gruppe	Risiko- gruppe 1	Risiko- gruppe 2
Netzhaut photochemisch	Messwert $(L_B)_{\text{mess}}$	240	9 799	41 709
	Emissionsgrenzwert L_B'	100	10 000	4 000 000
Netzhaut thermisch	Messwert $(L_R)_{\text{mess}}$	29 849	29 849	124 789
	Emissionsgrenzwert L_R'	5 600 000	5 600 000	14 200 000

Fazit:

Photochemische Netzhautgefährdung: ja
 Thermische Netzhautgefährdung: nein
 Einstufung: Risikogruppe 1
 Maximal zulässige Expositionsdauer t_{max} : 102 s

Weißlicht emittierende LED LUW W5AM (kaltweiß)

Die Farbtemperatur der Weißlicht emittierenden LED LUW W5AM beträgt 6 500 K. In 20 cm Entfernung von der LED wurde die Beleuchtungsstärke E_v von 1 162 lx gemessen.

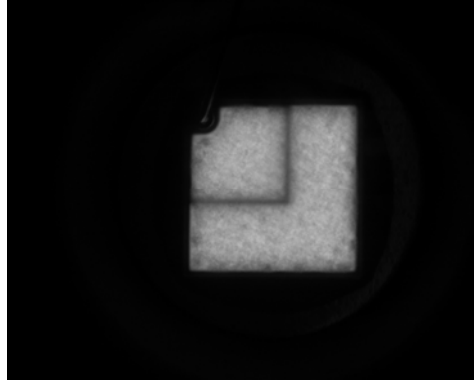


Abb. B 3.10 LED LUW W5AM - scheinbare Quelle

Größe der scheinbaren Quelle $d = 1,0 \text{ mm}$
 Winkelausdehnung der scheinbaren Quelle $\alpha = 5,0 \text{ mrad}$

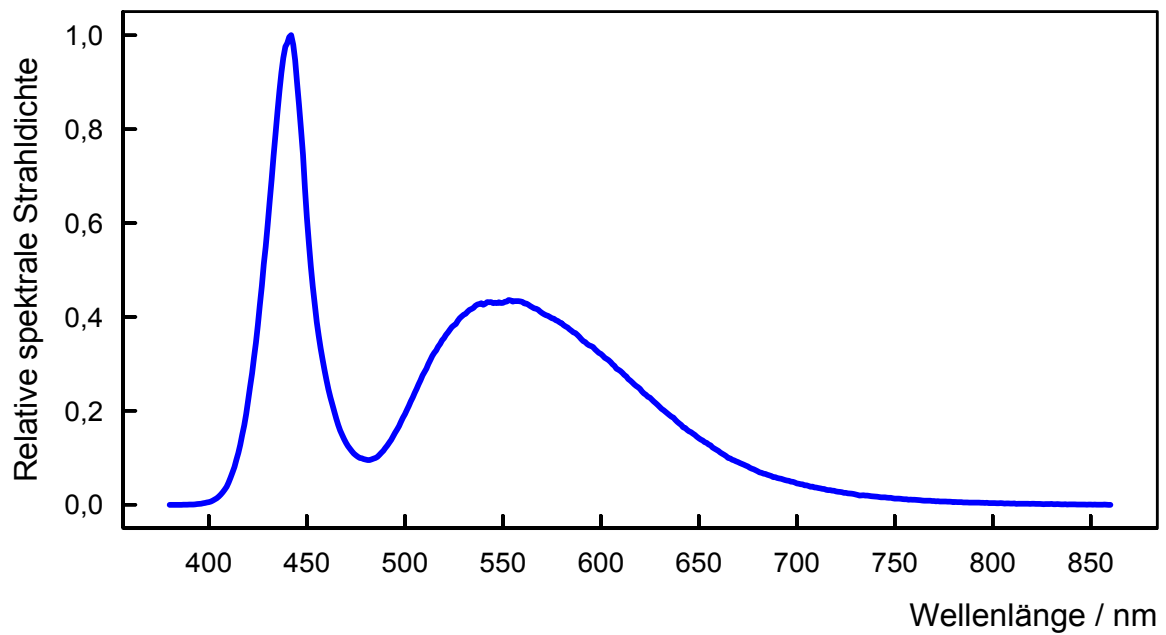


Abb. B 3.11 Relative spektrale Strahlidichte der LED LUW W5AM

Tab. B 3.5 Messwerte der effektiven Strahldichte $(L_B)_{\text{mess}}$ für die photochemische und $(L_R)_{\text{mess}}$ für die thermische Netzhautgefährdung der LED LUW W5AM sowie die dazugehörigen Emissionsgrenzwerte nach der Lampensicherheitsnorm

Gefährdung	Effektive Strahldichte/ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$	Freie Gruppe	Risiko- gruppe 1	Risiko- gruppe 2
Netzhaut photochemisch	Messwert $(L_B)_{\text{mess}}$	236	11 259	49 721
	Emissionsgrenzwert L_B'	100	10 000	4 000 000
Netzhaut thermisch	Messwert $(L_R)_{\text{mess}}$	31 681	31 681	152 983
	Emissionsgrenzwert L_R'	5 600 000	5 600 000	14 200 000

Fazit:

Photochemische Netzhautgefährdung: ja
 Thermische Netzhautgefährdung: nein
 Einstufung: Risikogruppe 2
 Maximal zulässige Expositionsdauer t_{max} : 20 s

B 4 LED Platinum Dragon (OSRAM)

Die Abbildung B 4.1 zeigt eine LED des Typs Platinum Dragon der Firma OSRAM. Diese LED wurden mit einer Stromstärke von 1,0 A betrieben.



Abb. B 4.1 Eine LED des Typs Platinum Dragon (OSRAM)

LED LA W5SN (amber)

In 20 cm Entfernung von der LED wurde die Beleuchtungsstärke E_v von 927 lx gemessen.

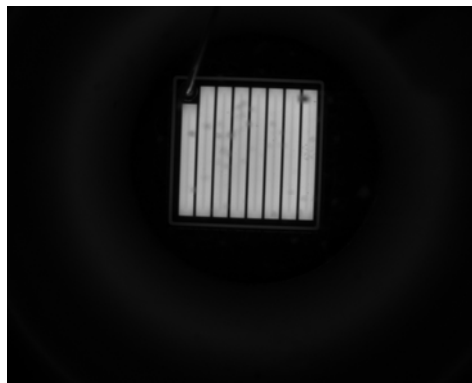


Abb. B 4.2 LED LA W5SN - scheinbare Quelle

Größe der scheinbaren Quelle	$d = 0,8 \text{ mm}$
Winkelausdehnung der scheinbaren Quelle	$\alpha = 4,0 \text{ mrad}$

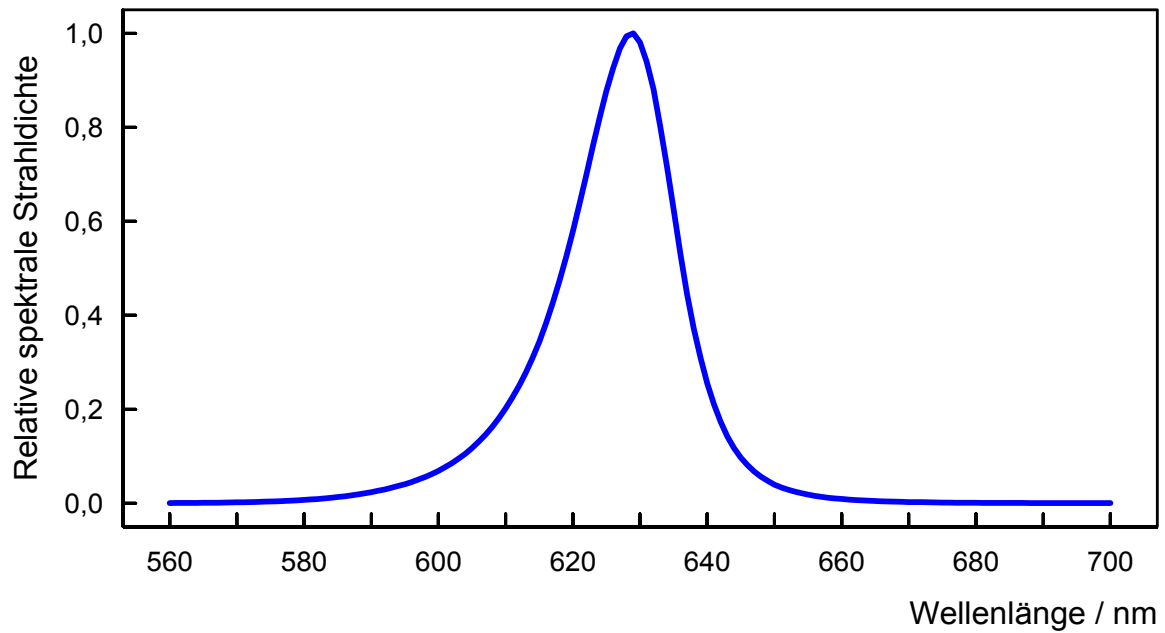


Abb. B 4.3 Relative spektrale Strahlidichte der LED LA W5SN

Tab. B 4.1 Messwerte der effektiven Strahlidichte $(L_B)_{\text{mess}}$ für die photochemische und $(L_R)_{\text{mess}}$ für die thermische Netzhautgefährdung der LED LA W5SN sowie die dazugehörigen Emissionsgrenzwerte nach der Lampensicherheitsnorm

Gefährdung	Effektive Strahlidichte/ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$	Freie Gruppe	Risiko- gruppe 1	Risiko- gruppe 2
Netzhaut photochemisch	Messwert $(L_B)_{\text{mess}}$	0	1	6
	Emissionsgrenzwert L_B'	100	10 000	4 000 000
Netzhaut thermisch	Messwert $(L_R)_{\text{mess}}$	27 654	27 654	139 973
	Emissionsgrenzwert L_R'	7 000 000	7 000 000	17 750 000

Fazit:

Photochemische Netzhautgefährdung: nein
 Thermische Netzhautgefährdung: nein
 Einstufung: Freie Gruppe

Rotlicht emittierende LED LR W5SN

In 20 cm Entfernung von der LED wurde die Beleuchtungsstärke E_v von 812 lx gemessen.



Abb. B 4.4 LED LR W5SN - scheinbare Quelle

Größe der scheinbaren Quelle $d = 0,8 \text{ mm}$
Winkelausdehnung der scheinbaren Quelle $\alpha = 4,0 \text{ mrad}$

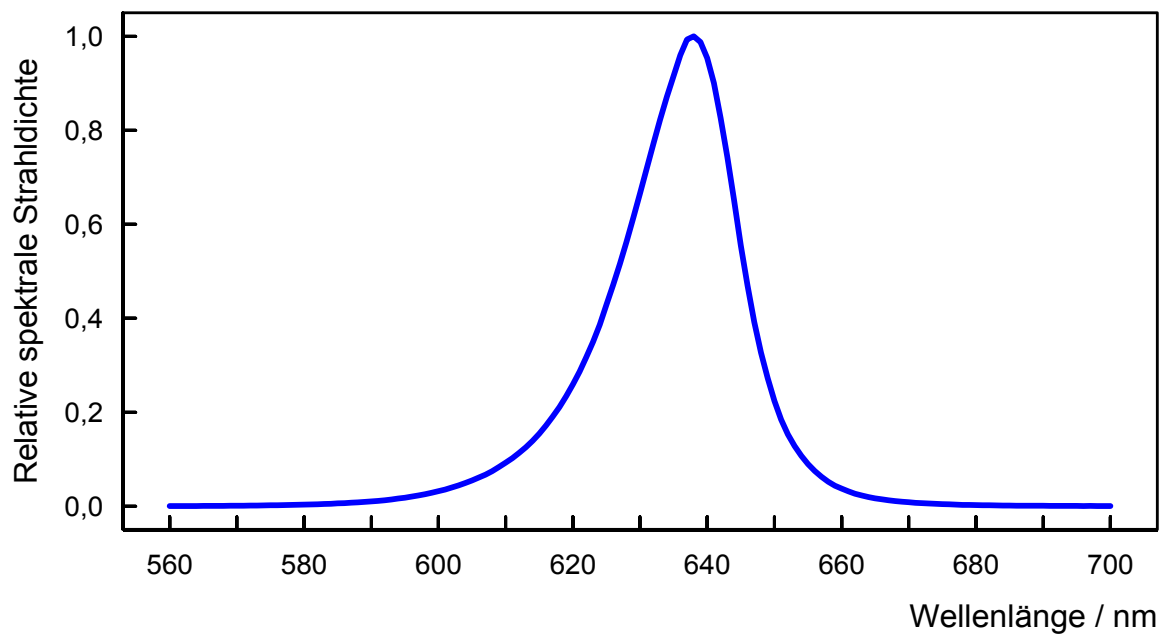


Abb. B 4.5 Relative spektrale Strahlendichte der LED LR W5SN

Tab. B 4.2 Messwerte der effektiven Strahldichte $(L_B)_{\text{mess}}$ für die photochemische und $(L_R)_{\text{mess}}$ für die thermische Netzhautgefährdung für LED LR W5SN sowie die dazugehörigen Emissionsgrenzwerte nach der Lampensicherheitsnorm

Gefährdung	Effektive Strahldichte/ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$	Freie Gruppe	Risiko- gruppe 1	Risiko- gruppe 2
Netzhaut photochemisch	Messwert $(L_B)_{\text{mess}}$	0	1	3
	Emissionsgrenzwert L_B'	100	10 000	4 000 000
Netzhaut thermisch	Messwert $(L_R)_{\text{mess}}$	27 983	27 983	150 223
	Emissionsgrenzwert L_R'	7 000 000	7 000 000	17 750 000

Fazit:

Photochemische Netzhautgefährdung: nein
 Thermische Netzhautgefährdung: nein
 Einstufung: Freie Gruppe

Weißlicht emittierende LED LCW W5SN (warmweiß)

Die Farbtemperatur der Weißlicht emittierenden LED LCW W5SN beträgt laut Herstellerangaben 2 500 - 4 800 K. Die Beleuchtungsstärke E_v in 20 cm Entfernung beträgt 701 lx.

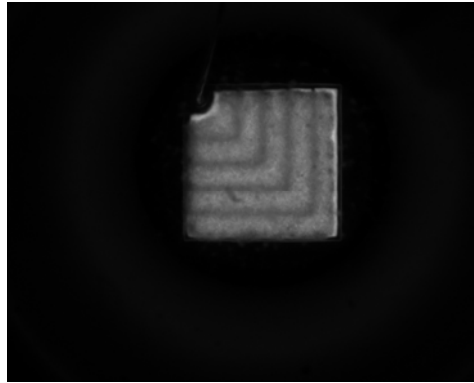


Abb. B 4.6 LED LCW W5SN - scheinbare Quelle

Größe der scheinbaren Quelle $d = 0,9 \text{ mm}$
 Winkelausdehnung der scheinbaren Quelle $\alpha = 4,5 \text{ mrad}$

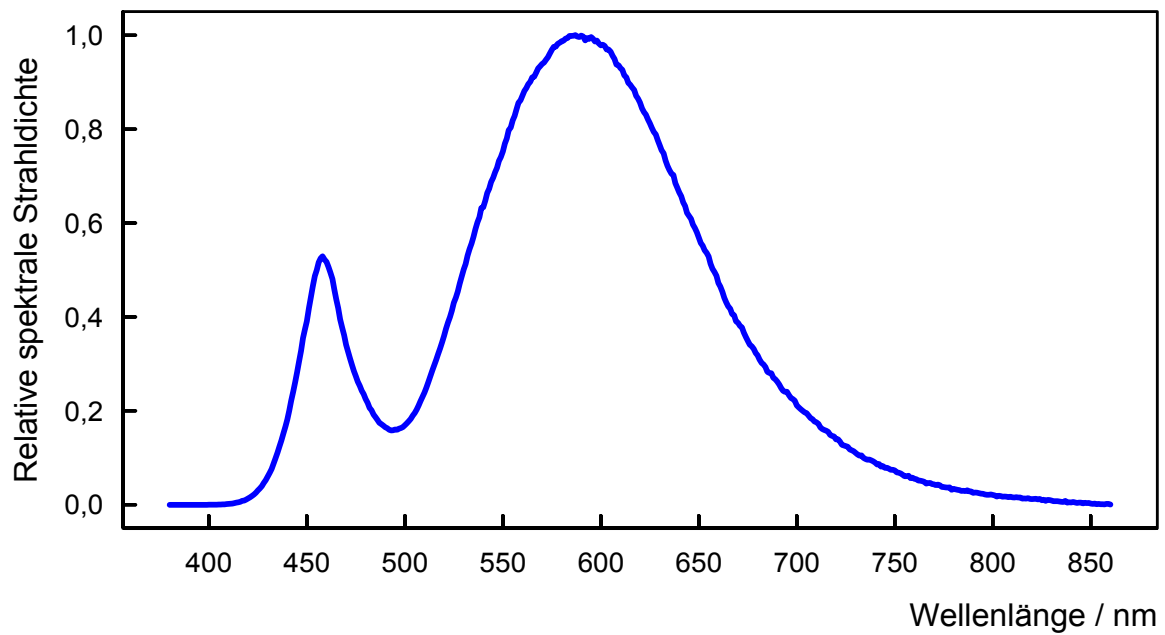


Abb. B 4.7 Relative spektrale Strahldichte der LED LCW W5SN

Tab. B 4.3 Messwerte der effektiven Strahldichte $(L_B)_{\text{mess}}$ für die photochemische und $(L_R)_{\text{mess}}$ für die thermische Netzhautgefährdung für LED LCW W5SN sowie die dazugehörigen Emissionsgrenzwerte nach der Lampensicherheitsnorm

Gefährdung	Effektive Strahldichte/ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$	Freie Gruppe	Risiko- gruppe 1	Risiko- gruppe 2
Netzhaut photochemisch	Messwert $(L_B)_{\text{mess}}$	69	1 888	7 193
	Emissionsgrenzwert L_B'	100	10 000	4 000 000
Netzhaut thermisch	Messwert $(L_R)_{\text{mess}}$	11 791	11 791	75 057
	Emissionsgrenzwert L_R'	6 222 222	6 222 222	15 777 778

Fazit:

Photochemische Netzhautgefährdung: nein
 Thermische Netzhautgefährdung: nein
 Einstufung: Freie Gruppe

Weißlicht emittierende LED LW W5SN (kaltweiß)

Die Farbtemperatur der Weißlicht emittierenden LED LW W5SN beträgt 5 600 K. In 20 cm Entfernung von der LED wurde die Beleuchtungsstärke E_v von 812 lx gemessen.



Abb. B 4.8 LED LW W5SN - scheinbare Quelle

Größe der scheinbaren Quelle $d = 0,9 \text{ mm}$
 Winkelausdehnung der scheinbaren Quelle $\alpha = 4,5 \text{ mrad}$

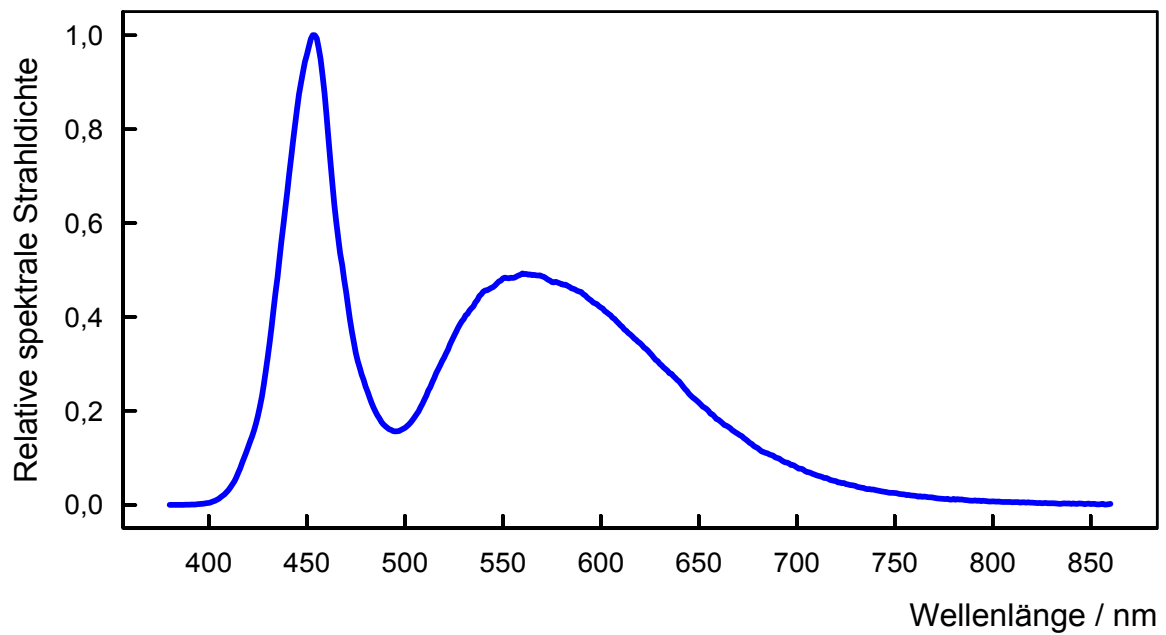


Abb. B 4.9 Relative spektrale Strahlendichte der LED LW W5SN

Tab. B 4.4 Messwerte der effektiven Strahldichte $(L_B)_{\text{mess}}$ für die photochemische und $(L_R)_{\text{mess}}$ für die thermische Netzhautgefährdung der LED LW W5SN sowie die dazugehörigen Emissionsgrenzwerte nach der Lampensicherheitsnorm

Gefährdung	Effektive Strahldichte/ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$	Freie Gruppe	Risiko- gruppe 1	Risiko- gruppe 2
Netzhaut photochemisch	Messwert $(L_B)_{\text{mess}}$	161	6 348	29 515
	Emissionsgrenzwert L_B'	100	10 000	4 000 000
Netzhaut thermisch	Messwert $(L_R)_{\text{mess}}$	21 115	21 115	95 906
	Emissionsgrenzwert L_R'	6 222 222	6 222 222	15 777 778

Fazit:

Photochemische Netzhautgefährdung: ja
 Thermische Netzhautgefährdung: nein
 Einstufung: Risikogruppe 1
 Maximal zulässige Expositionsdauer t_{max} : 158 s

B 5 LED Diamond Dragon (OSRAM)

Die Abbildung B 5.1 zeigt eine LED des Typs Diamond Dragon der Firma OSRAM. Diese LED wurden mit einer Stromstärke von 1,4 A betrieben, mit Ausnahme der LED LCW W5AP, die mit 2,0 A betrieben wurde.



Abb. B 5.1 Eine LED des Typs Diamond Dragon (OSRAM)

Blaulicht emittierende LB W5AP

Die Beleuchtungsstärke E_v in 20 cm Entfernung beträgt 322 lx.

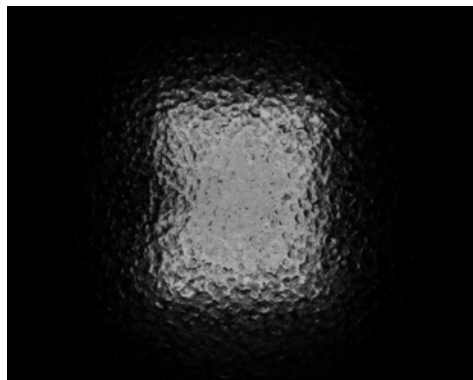


Abb. B 5.2 LED LB W5AP - scheinbare Quelle

Größe der scheinbaren Quelle	$d = 2,0 \text{ mm}$
Winkelausdehnung der scheinbaren Quelle	$\alpha = 10,0 \text{ mrad}$

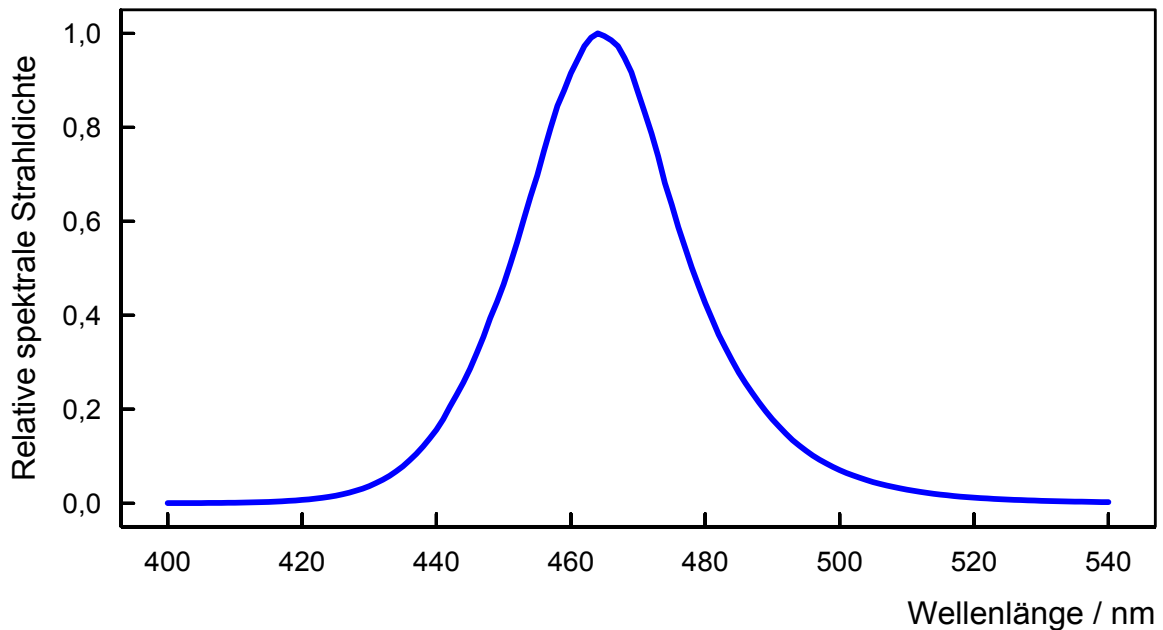


Abb. B 5.3 Relative spektrale Strahlidichte der LED LB W5AP

Tab. B 5.1 Messwerte der effektiven Strahlidichte $(L_B)_{\text{mess}}$ für die photochemische und $(L_R)_{\text{mess}}$ für die thermische Netzhautgefährdung der LED LB W5AP sowie die dazugehörigen Emissionsgrenzwerte nach der Lampensicherheitsnorm

Gefährdung	Effektive Strahlidichte/ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$	Freie Gruppe	Risiko- gruppe 1	Risiko- gruppe 2
Netzhaut photochemisch	Messwert $(L_B)_{\text{mess}}$	1 102	41 845	84 096
	Emissionsgrenzwert L_B'	100	10 000	4 000 000
Netzhaut thermisch	Messwert $(L_R)_{\text{mess}}$	60 048	60 048	123 406
	Emissionsgrenzwert L_R'	2 800 000	2 800 000	7 100 000

Fazit:

Photochemische Netzhautgefährdung: ja
 Thermische Netzhautgefährdung: nein
 Einstufung: Risikogruppe 2
 Maximal zulässige Expositionsdauer t_{max} : 12 s

Grünlicht emittierende LED LT W5AP

In 20 cm Entfernung von der LED wurde die Beleuchtungsstärke E_v von 1 326 lx gemessen.

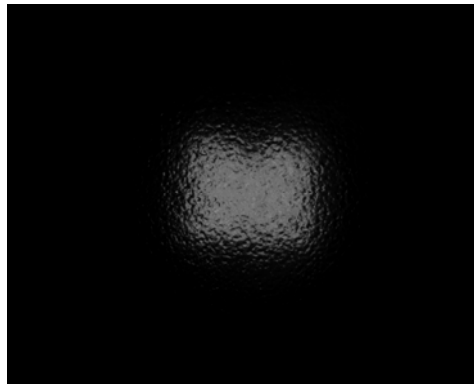


Abb. B 5.4 LED LT W5AP - scheinbare Quelle

Größe der scheinbaren Quelle $d = 2,2 \text{ mm}$
Winkelausdehnung der scheinbaren Quelle $\alpha = 11,0 \text{ mrad}$

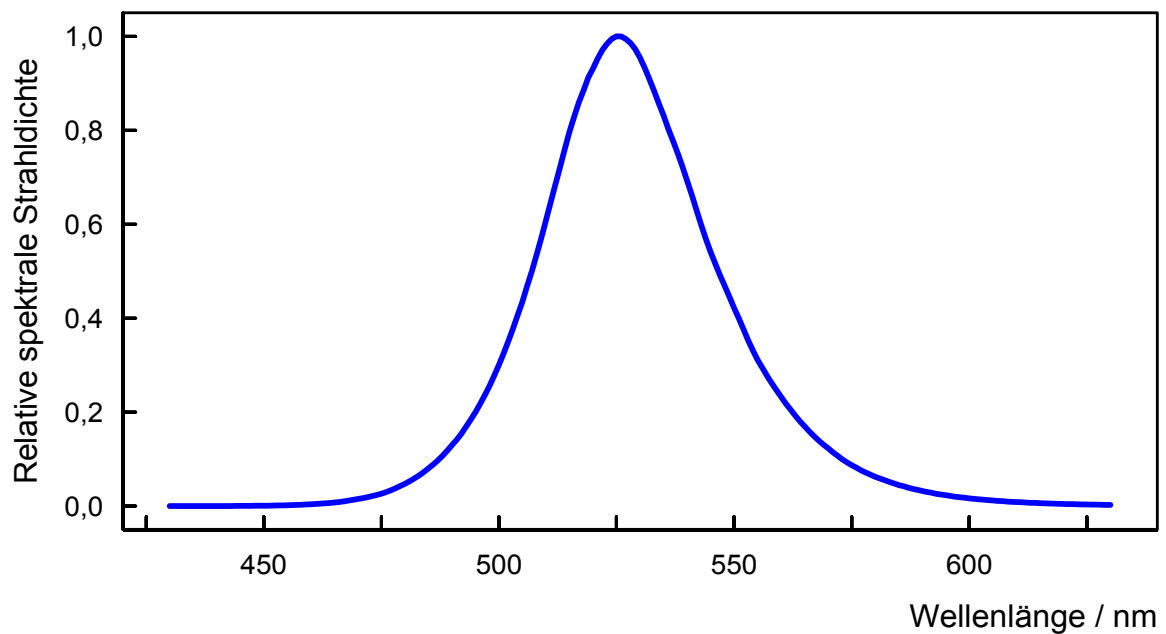


Abb. B 5.5 Relative spektrale Strahlidichte der LED LT W5AP

Tab. B 5.2 Messwerte der effektiven Strahldichte $(L_B)_{\text{mess}}$ für die photochemische und $(L_R)_{\text{mess}}$ für die thermische Netzhautgefährdung der LED LT W5AP sowie die dazugehörigen Emissionsgrenzwerte nach der Lampensicherheitsnorm

Gefährdung	Effektive Strahldichte/ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$	Freie Gruppe	Risiko- gruppe 1	Risiko- gruppe 2
Netzhaut photochemisch	Messwert $(L_B)_{\text{mess}}$	25	1 009	1 667
	Emissionsgrenzwert L_B'	100	10 000	4 000 000
Netzhaut thermisch	Messwert $(L_R)_{\text{mess}}$	21 442	21 442	36 015
	Emissionsgrenzwert L_R'	2 545 455	2 545 455	6 454 545

Fazit:

Photochemische Netzhautgefährdung: nein
 Thermische Netzhautgefährdung: nein
 Einstufung: Freie Gruppe

Rotlicht emittierende LED LR W5AP

In 20 cm Entfernung von der LED wurde die Beleuchtungsstärke E_v von 586 lx gemessen.

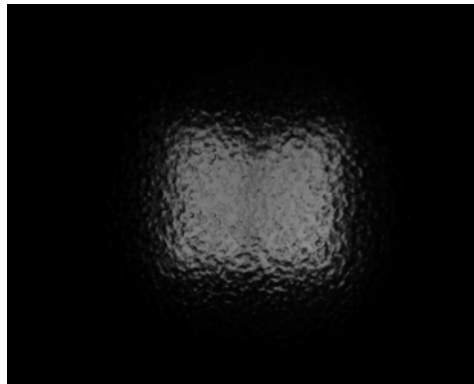


Abb. B 5.6 LED LR W5AP - scheinbare Quelle

Größe der scheinbaren Quelle $d = 2,0 \text{ mm}$
 Winkelausdehnung der scheinbaren Quelle $\alpha = 10,0 \text{ mrad}$

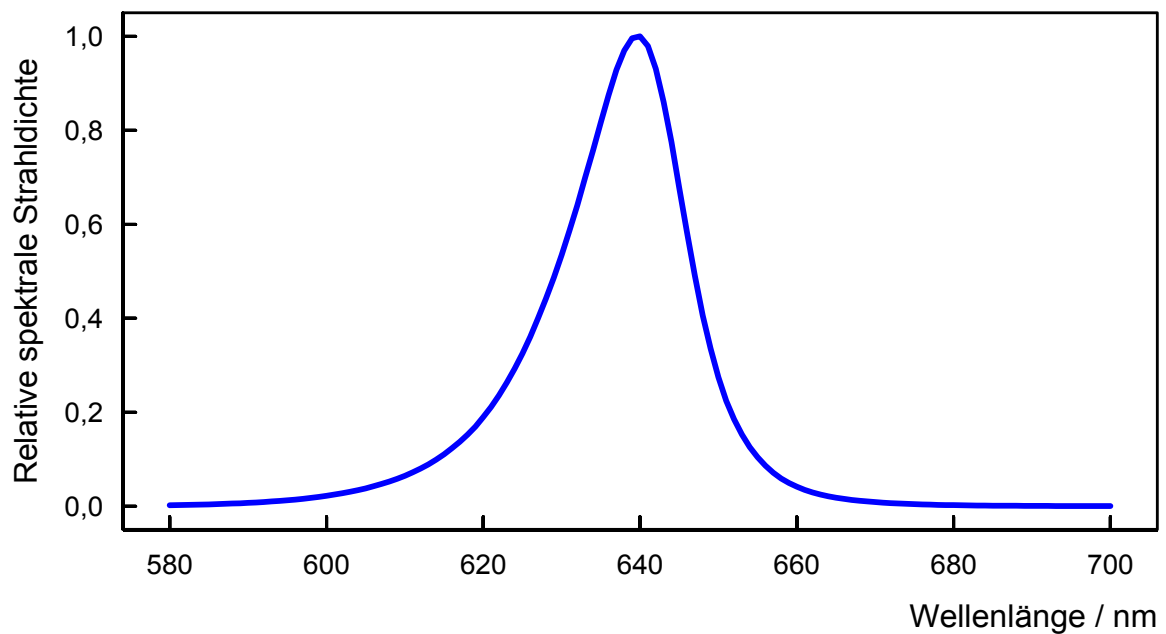


Abb. B 5.7 Relative spektrale Strahlidichte der LED LR W5AP

Tab. B 5.3 Messwerte der effektiven Strahldichte $(L_B)_{\text{mess}}$ für die photochemische und $(L_R)_{\text{mess}}$ für die thermische Netzhautgefährdung für LED LR W5AP sowie die dazugehörigen Emissionsgrenzwerte nach der Lampensicherheitsnorm

Gefährdung	Effektive Strahldichte/ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$	Freie Gruppe	Risiko- gruppe 1	Risiko- gruppe 2
Netzhaut photochemisch	Messwert $(L_B)_{\text{mess}}$	0	0	1
	Emissionsgrenzwert L_B'	100	10 000	4 000 000
Netzhaut thermisch	Messwert $(L_R)_{\text{mess}}$	37 270	37 270	74 345
	Emissionsgrenzwert L_R'	2 800 000	2 800 000	7 100 000

Fazit:

Photochemische Netzhautgefährdung: nein
 Thermische Netzhautgefährdung: nein
 Einstufung: Freie Gruppe

Weißlicht emittierende LED LCW W5AP (warmweiß)

Die Farbtemperatur der Weißlicht emittierenden LED LCW W5AP beträgt laut Herstellerangaben 2 500 - 4 800 K. Diese LED wurde mit einer Stromstärke von 2,0 A betrieben. In 20 cm Entfernung von der LED wurde die Beleuchtungsstärke E_v von 1 355 lx gemessen.

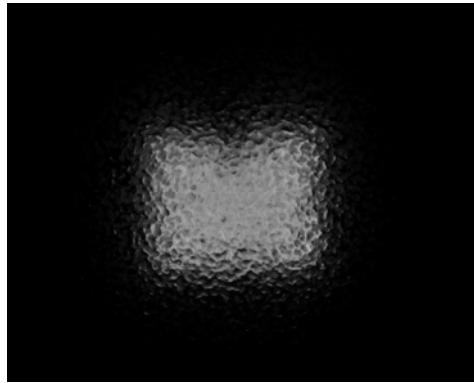


Abb. B 5.8 LED LCW W5AP - scheinbare Quelle

Größe der scheinbaren Quelle $d = 1,9 \text{ mm}$
 Winkelausdehnung der scheinbaren Quelle $\alpha = 9,5 \text{ mrad}$

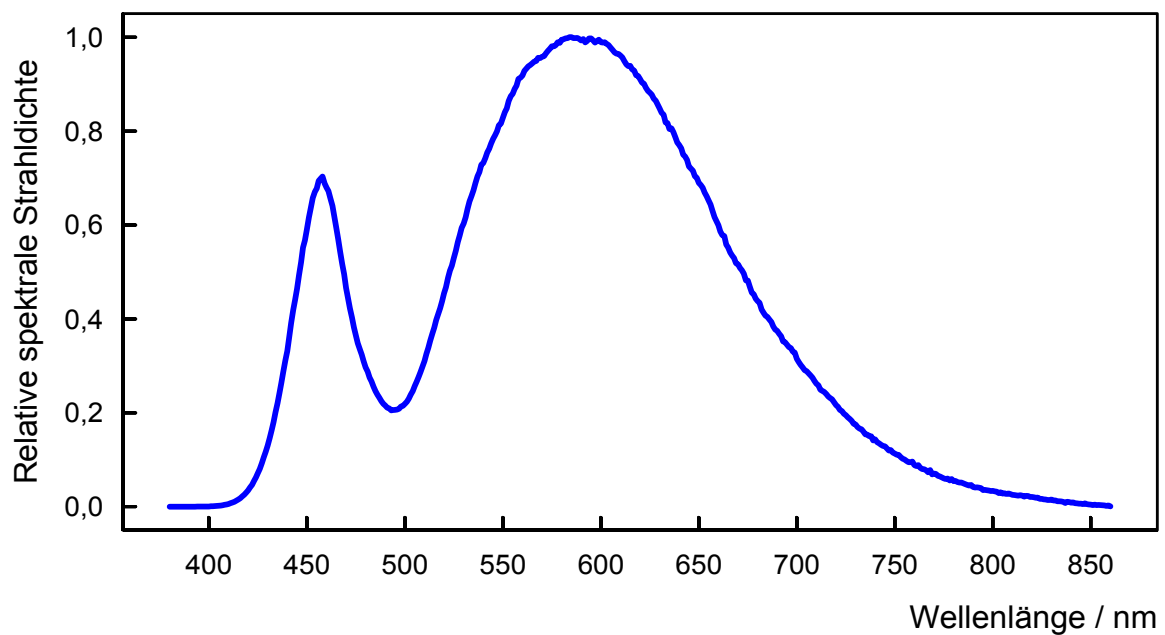


Abb. B 5.9 Relative spektrale Strahlendichte der LED LCW W5AP

Tab. B 5.4 Messwerte der effektiven Strahldichte $(L_B)_{\text{mess}}$ für die photochemische und $(L_R)_{\text{mess}}$ für die thermische Netzhautgefährdung für LED LCW W5AP sowie die dazugehörigen Emissionsgrenzwerte nach der Lampensicherheitsnorm

Gefährdung	Effektive Strahldichte/ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$	Freie Gruppe	Risiko- gruppe 1	Risiko- gruppe 2
Netzhaut photochemisch	Messwert $(L_B)_{\text{mess}}$	119	3 408	9 085
	Emissionsgrenzwert L_B'	100	10 000	4 000 000
Netzhaut thermisch	Messwert $(L_R)_{\text{mess}}$	28 774	28 774	76 360
	Emissionsgrenzwert L_R'	2 947 368	2 947 368	7 473 684

Fazit:

Photochemische Netzhautgefährdung: ja
 Thermische Netzhautgefährdung: nein
 Einstufung: Risikogruppe 1
 Maximal zulässige Expositionsdauer t_{max} : 293 s

Weißlicht emittierende LED LUW W5AP (kaltweiß)

Die Farbtemperatur der Weißlicht emittierenden LED LUW W5AP beträgt 6 500 K.
Die Beleuchtungsstärke E_v in 20 cm Entfernung beträgt 1 411 lx.

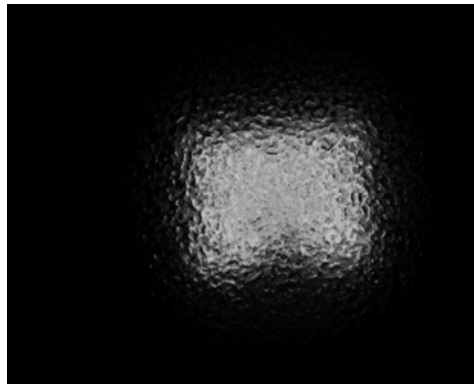


Abb. B 5.10 LED LUW W5AP - scheinbare Quelle

Größe der scheinbaren Quelle $d = 2,0 \text{ mm}$
Winkelausdehnung der scheinbaren Quelle $\alpha = 10,0 \text{ mrad}$

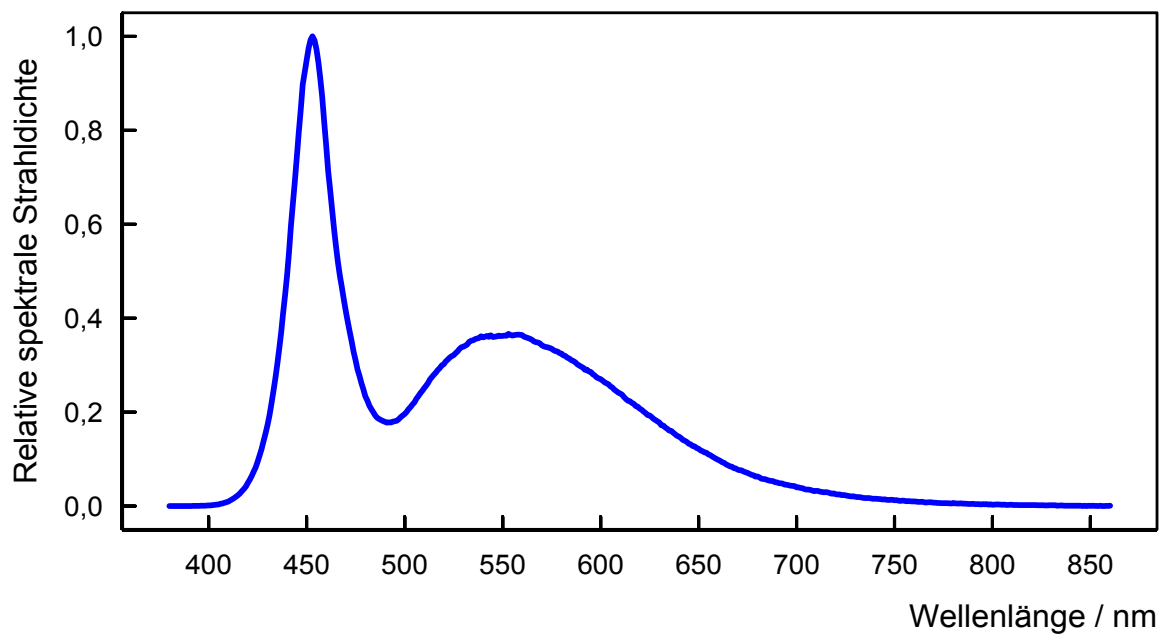


Abb. B 5.11 Relative spektrale Strahldichte der LED LUW W5AP

Tab. B 5.5 Messwerte der effektiven Strahldichte $(L_B)_{\text{mess}}$ für die photochemische und $(L_R)_{\text{mess}}$ für die thermische Netzhautgefährdung der LED LUW W5AP sowie die dazugehörigen Emissionsgrenzwerte nach der Lampensicherheitsnorm

Gefährdung	Effektive Strahldichte/ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$	Freie Gruppe	Risiko- gruppe 1	Risiko- gruppe 2
Netzhaut photochemisch	Messwert $(L_B)_{\text{mess}}$	369	12 910	28 205
	Emissionsgrenzwert L_B'	100	10 000	4 000 000
Netzhaut thermisch	Messwert $(L_R)_{\text{mess}}$	37 174	37 174	83 859
	Emissionsgrenzwert L_R'	2 800 000	2 800 000	7 100 000

Fazit:

Photochemische Netzhautgefährdung: ja
 Thermische Netzhautgefährdung: nein
 Einstufung: Risikogruppe 2
 Maximal zulässige Expositionsdauer t_{max} : 35 s

Weißlicht emittierende LED LW W5AP (kaltweiß)

Die Farbtemperatur der Weißlicht emittierenden LED LW W5AP beträgt 5 600 K. In 20 cm Entfernung von der LED wurde die Beleuchtungsstärke E_v von 1 154 lx gemessen.

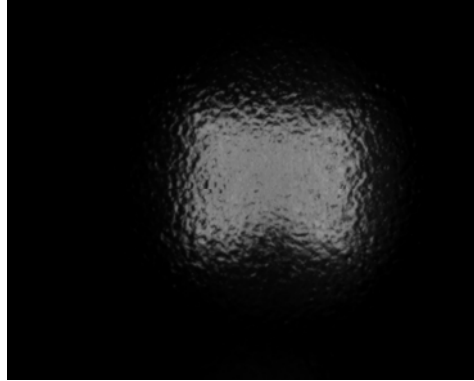


Abb. B 5.12 LED LW W5AP - scheinbare Quelle

Größe der scheinbaren Quelle $d = 2,0 \text{ mm}$
 Winkelausdehnung der scheinbaren Quelle $\alpha = 10,0 \text{ mrad}$

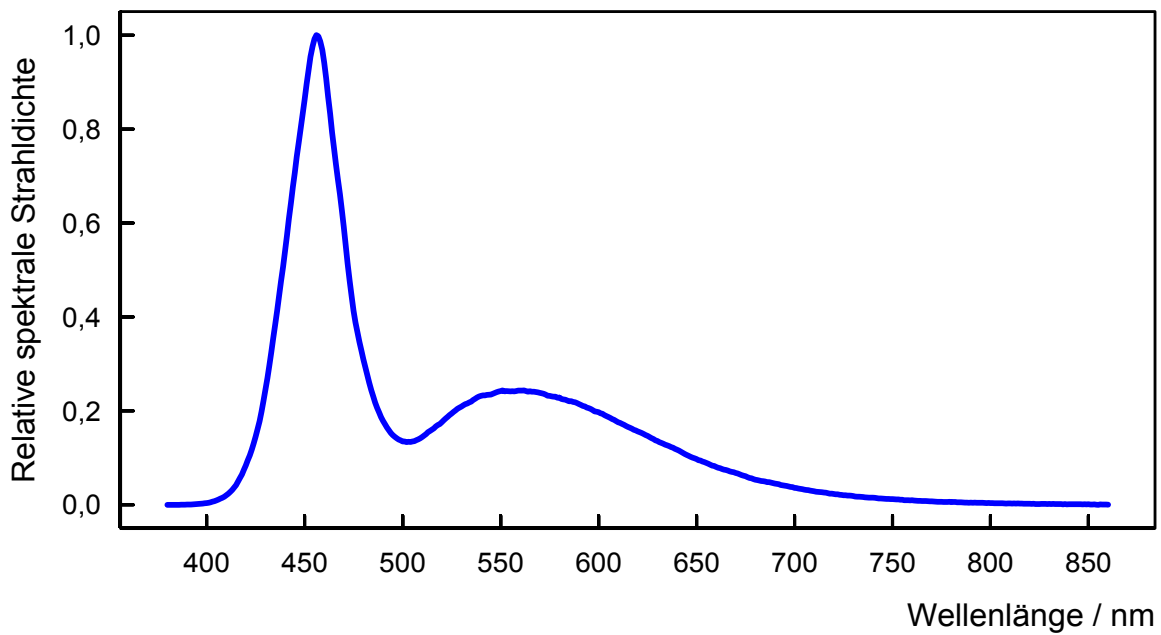


Abb. B 5.13 Relative spektrale Strahlidichte der LED LW W5AP

Tab. B 5.6 Messwerte der effektiven Strahldichte $(L_B)_{\text{mess}}$ für die photochemische und $(L_R)_{\text{mess}}$ für die thermische Netzhautgefährdung der LED LW W5AP sowie die dazugehörigen Emissionsgrenzwerte nach der Lampensicherheitsnorm

Gefährdung	Effektive Strahldichte/ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$	Freie Gruppe	Risiko- gruppe 1	Risiko- gruppe 2
Netzhaut photochemisch	Messwert $(L_B)_{\text{mess}}$	390	14 248	43 792
	Emissionsgrenzwert L_B'	100	10 000	4 000 000
Netzhaut thermisch	Messwert $(L_R)_{\text{mess}}$	33 579	33 579	101 305
	Emissionsgrenzwert L_R'	2 800 000	2 800 000	7 100 000

Fazit:

Photochemische Netzhautgefährdung: ja
 Thermische Netzhautgefährdung: nein
 Einstufung: Risikogruppe 2
 Maximal zulässige Expositionsdauer t_{max} : 23 s

B 6 LED Oslux (OSRAM)

Weißlicht emittierende LED LW F65G (kaltweiß)

Die Abbildung 6.1 zeigt eine Oslux-LED des Typs LW F65G der Firma OSRAM. Die Farbtemperatur dieser LED beträgt 5 600 K. Die LED wurde mit einer Stromstärke von 0,5 A betrieben. Die Beleuchtungsstärke E_v in 20 cm Entfernung beträgt 893 lx.

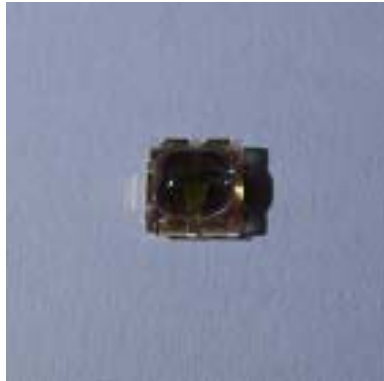


Abb. B 6.1 Eine Oslux-LED LW F65G (OSRAM)



Abb. B 6.2 LED LW F65G - scheinbare Quelle

Größe der scheinbaren Quelle	$d = 1,5 \text{ mm}$
Winkelausdehnung der scheinbaren Quelle	$\alpha = 7,5 \text{ mrad}$

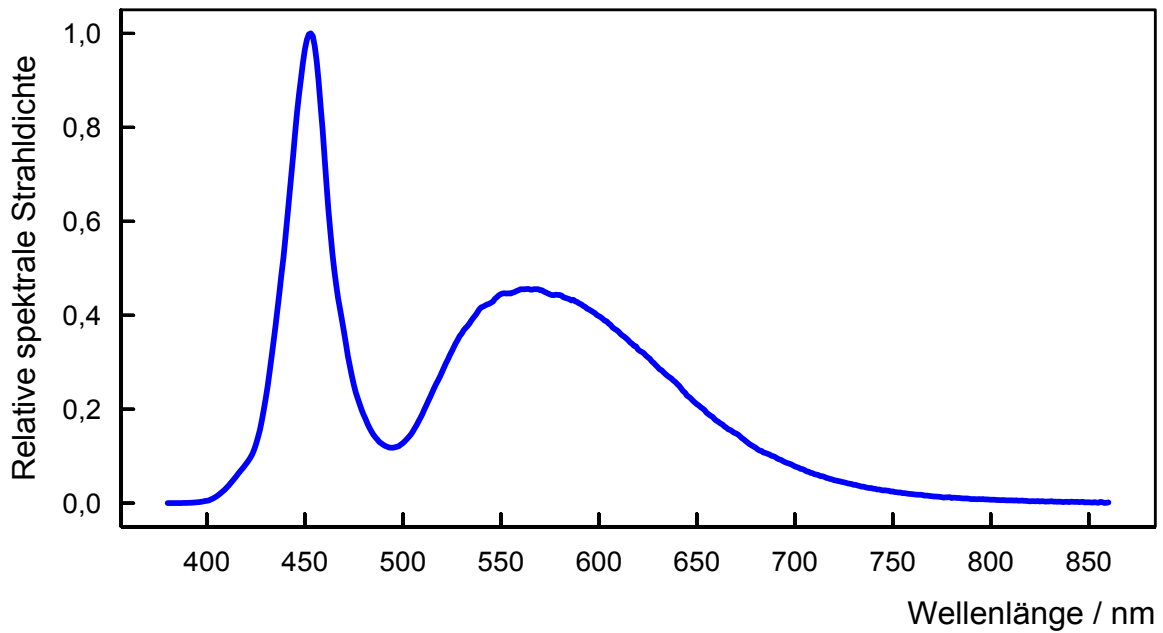


Abb. B 6.3 Relative spektrale Strahlidichte der LED LW F65G

Tab. B 6.1 Messwerte der effektiven Strahlidichte $(L_B)_{\text{mess}}$ für die photochemische und $(L_R)_{\text{mess}}$ für die thermische Netzhautgefährdung der LED LW F65G sowie die dazugehörigen Emissionsgrenzwerte nach der Lampensicherheitsnorm

Gefährdung	Effektive Strahlidichte/ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$	Freie Gruppe	Risiko- gruppe 1	Risiko- gruppe 2
Netzhaut photochemisch	Messwert $(L_B)_{\text{mess}}$	206	8 902	17 073
	Emissionsgrenzwert L_B'	100	10 000	4 000 000
Netzhaut thermisch	Messwert $(L_R)_{\text{mess}}$	30 828	30 828	65 285
	Emissionsgrenzwert L_R'	3 733 333	3 733 333	9 466 667

Fazit:

Photochemische Netzhautgefährdung: ja
 Thermische Netzhautgefährdung: nein
 Einstufung: Risikogruppe 1
 Maximal zulässige Expositionsdauer t_{max} : 112 s

B 7 LED ELS (Roithner)

Die Abbildung 7.1 zeigt eine LED des Typs ELS von der Firma Roithner. Diese LED wurden mit einer Stromstärke von 0,35 A betrieben.



Abb. B 7.1 Eine LED des Typs ELS (Roithner)

Blaulicht emittierende LED ELS

Die Beleuchtungsstärke E_v in 20 cm Entfernung beträgt 965 lx.

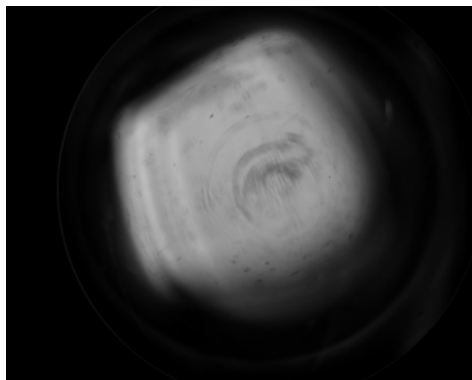


Abb. B 7.2 LED ELS blau - scheinbare Quelle

Größe der scheinbaren Quelle	$d = 5,6 \text{ mm}$
Winkelausdehnung der scheinbaren Quelle	$\alpha = 28,0 \text{ mrad}$

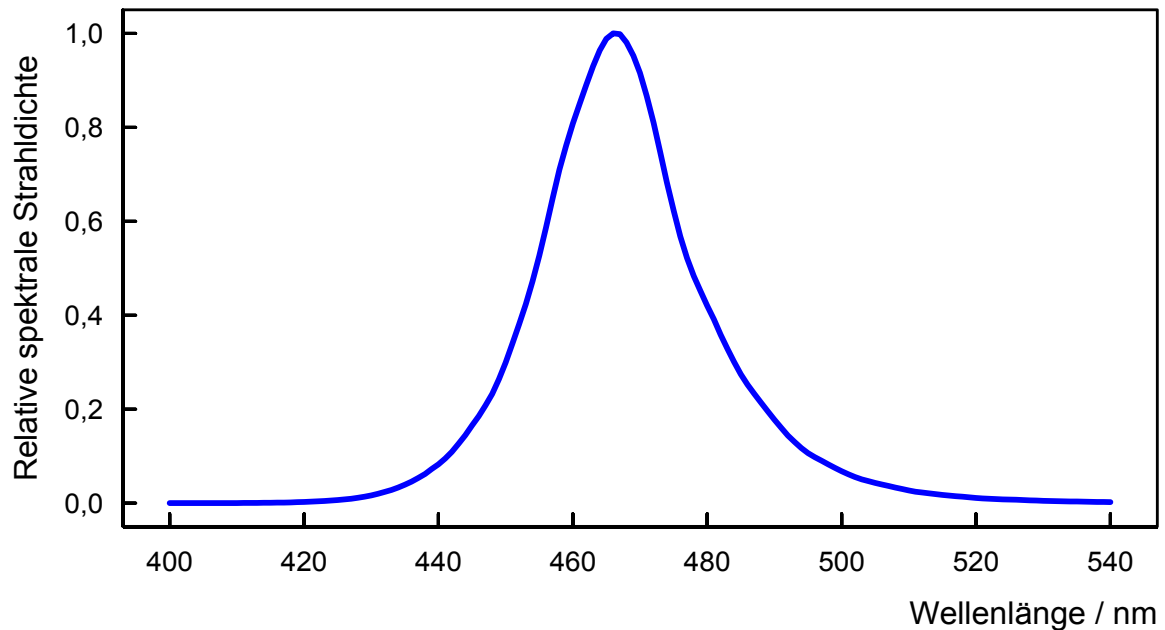


Abb. B 7.3 Relative spektrale Strahlidichte der LED ELS blau

Tab. B 7.1 Messwerte der effektiven Strahlidichte $(L_B)_{\text{mess}}$ für die photochemische und $(L_R)_{\text{mess}}$ für die thermische Netzhautgefährdung der LED ELS blau sowie die dazugehörigen Emissionsgrenzwerte nach der Lampensicherheitsnorm

Gefährdung	Effektive Strahlidichte/ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$	Freie Gruppe	Risiko- gruppe 1	Risiko- gruppe 2
Netzhaut photochemisch	Messwert $(L_B)_{\text{mess}}$	3 547	10 692	14 232
	Emissionsgrenzwert L_B	100	10 000	4 000 000
Netzhaut thermisch	Messwert $(L_R)_{\text{mess}}$	16 392	16 392	21 500
	Emissionsgrenzwert L_R'	1 000 000	1 000 000	2 535 714

Fazit:

Photochemische Netzhautgefährdung: ja
 Thermische Netzhautgefährdung: nein
 Einstufung: Risikogruppe 2
 Maximal zulässige Expositionsdauer t_{max} : 70 s

Grünlicht emittierende LED ELS

In 20 cm Entfernung von der LED wurde die Beleuchtungsstärke E_v von 3 632 lx gemessen.

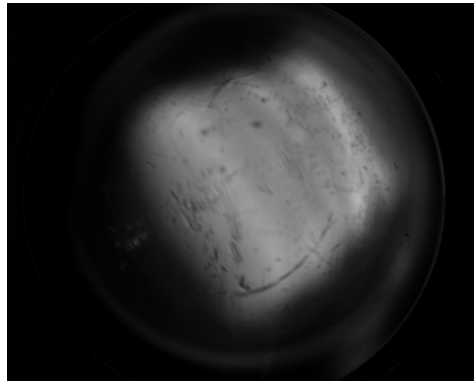


Abb. B 7.4 LED ELS grün - scheinbare Quelle

Größe der scheinbaren Quelle	$d = 5,7 \text{ mm}$
Winkelausdehnung der scheinbaren Quelle	$\alpha = 28,5 \text{ mrad}$

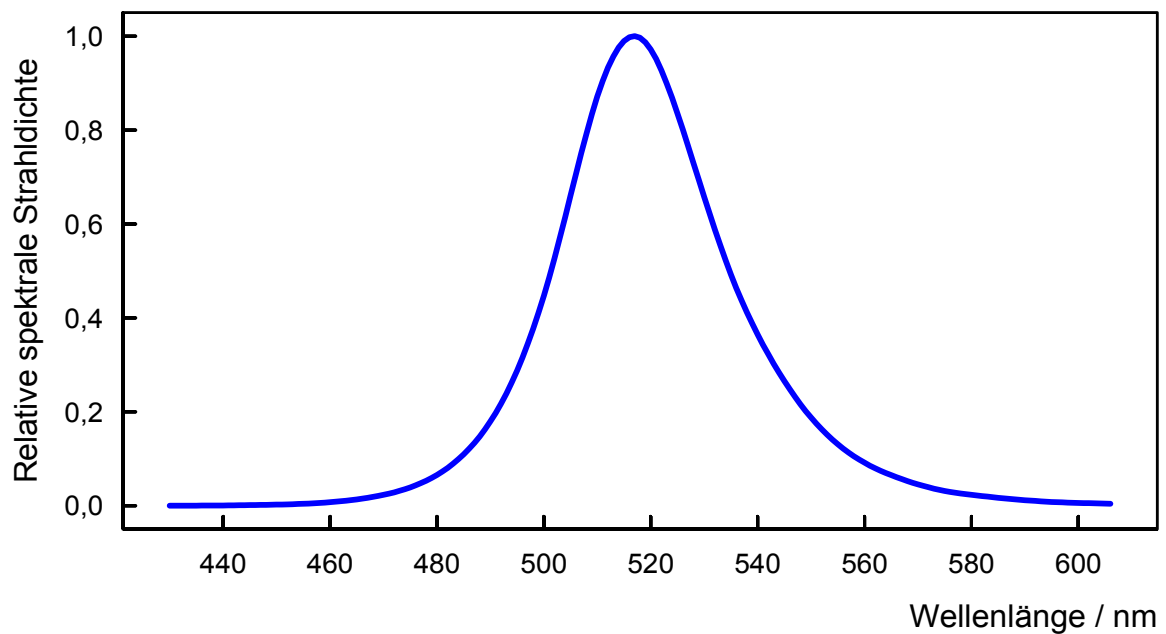


Abb. B 7.5 Relative spektrale Strahlidichte der LED ELS grün

Tab. B 7.2 Messwerte der effektiven Strahldichte $(L_B)_{\text{mess}}$ für die photochemische und $(L_R)_{\text{mess}}$ für die thermische Netzhautgefährdung der LED ELS grün sowie die dazugehörigen Emissionsgrenzwerte nach der Lampensicherheitsnorm

Gefährdung	Effektive Strahldichte/ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$	Freie Gruppe	Risiko- gruppe 1	Risiko- gruppe 2
Netzhaut photochemisch	Messwert $(L_B)_{\text{mess}}$	177	599	639
	Emissionsgrenzwert L_B'	100	10 000	4 000 000
Netzhaut thermisch	Messwert $(L_R)_{\text{mess}}$	9 094	9 094	9 599
	Emissionsgrenzwert L_R'	982 456	982 456	2 491 228

Fazit:

Photochemische Netzhautgefährdung: ja
 Thermische Netzhautgefährdung: nein
 Einstufung: Risikogruppe 1
 Maximal zulässige Expositionsdauer t_{max} : 1 669 s \approx 28 min

LED ELS amber

Die Beleuchtungsstärke E_v in 20 cm Entfernung beträgt 2 334 lx.

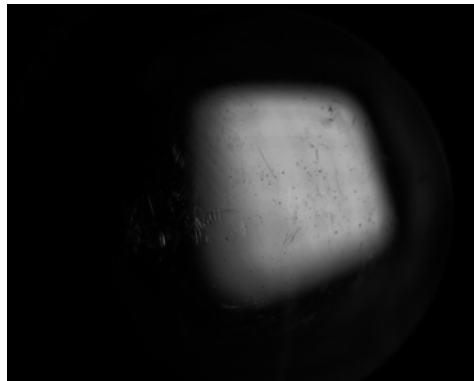


Abb. B 7.6 LED ELS amber - scheinbare Quelle

Größe der scheinbaren Quelle $d = 4,3 \text{ mm}$
Winkelausdehnung der scheinbaren Quelle $\alpha = 21,5 \text{ mrad}$

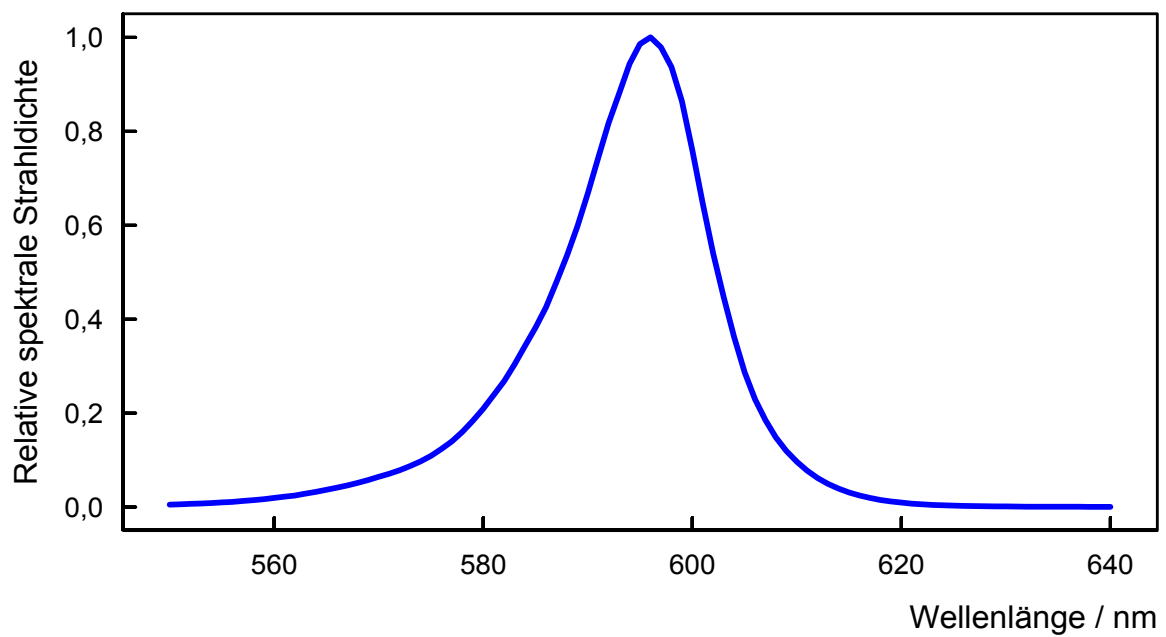


Abb. B 7.7 Relative spektrale Strahldichte der LED ELS amber

Tab. B 7.3 Messwerte der effektiven Strahldichte $(L_B)_{\text{mess}}$ für die photochemische und $(L_R)_{\text{mess}}$ für die thermische Netzhautgefährdung der LED ELS amber sowie die dazugehörigen Emissionsgrenzwerte nach der Lampensicherheitsnorm

Gefährdung	Effektive Strahldichte/ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$	Freie Gruppe	Risiko- gruppe 1	Risiko- gruppe 2
Netzhaut photochemisch	Messwert $(L_B)_{\text{mess}}$	1	9	8
	Emissionsgrenzwert L_B'	100	10 000	4 000 000
Netzhaut thermisch	Messwert $(L_R)_{\text{mess}}$	6 240	6 240	6 328
	Emissionsgrenzwert L_R'	1 302 326	1 302 326	3 302 326

Fazit:

Photochemische Netzhautgefährdung: nein
 Thermische Netzhautgefährdung: nein
 Einstufung: Freie Gruppe

B 8 LED HP 803 (Roithner)

Die Abbildung 8.1 zeigt eine LED des Typs HP 803 der Firma Roithner. Diese LED wurden mit einer Stromstärke von 0,7 A betrieben.



Abb. B 8.1 Eine LED des Typs HP 803 (Roithner)

Blaulicht emittierende LED HP 803 NB

In 20 cm Entfernung von der LED wurde die Beleuchtungsstärke E_v von 132 lx gemessen.

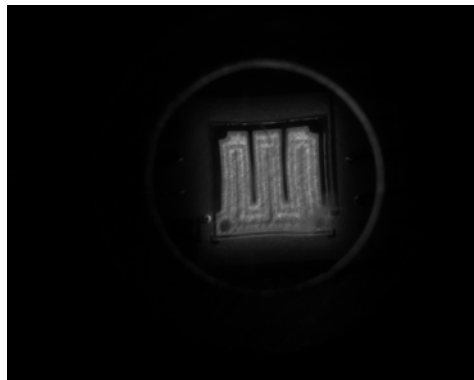


Abb. B 8.2 LED HP 803 NB - scheinbare Quelle

Größe der scheinbaren Quelle	$d = 1,3 \text{ mm}$
Winkelausdehnung der scheinbaren Quelle	$\alpha = 6,5 \text{ mrad}$

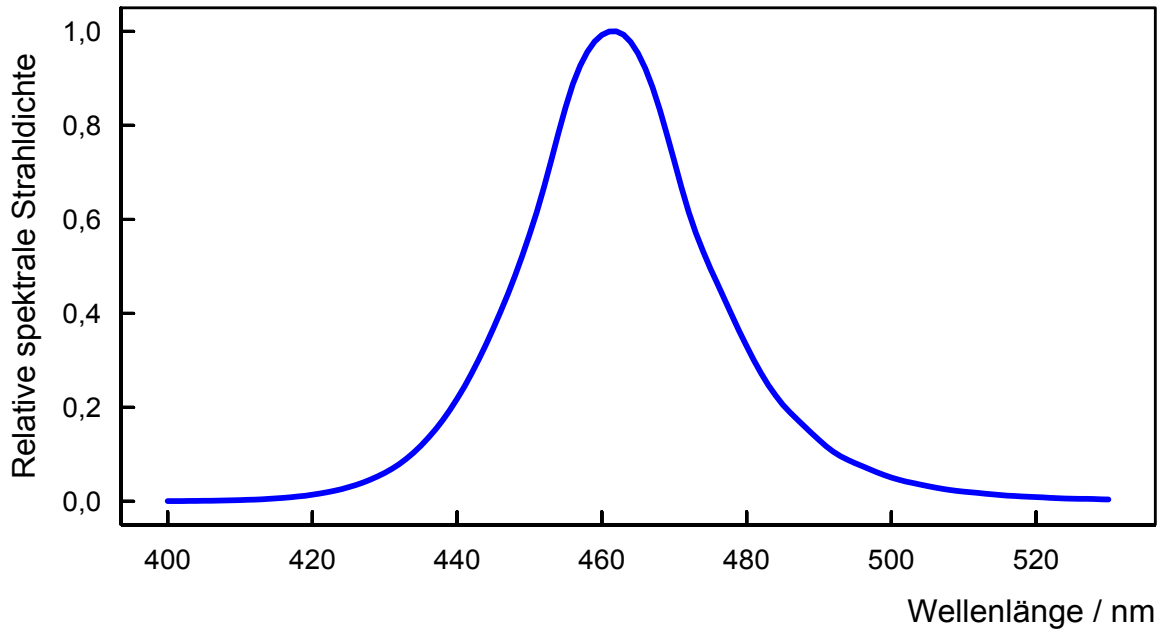


Abb. B 8.3 Relative spektrale Strahlidichte der LED HP 803 NB

Tab. B 8.1 Messwerte der effektiven Strahlidichte $(L_B)_{\text{mess}}$ für die photochemische und $(L_R)_{\text{mess}}$ für die thermische Netzhautgefährdung für LED HP 803 NB sowie die dazugehörigen Emissionsgrenzwerte nach der Lampensicherheitsnorm

Gefährdung	Effektive Strahlidichte/ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$	Freie Gruppe	Risiko- gruppe 1	Risiko- gruppe 2
Netzhaut photochemisch	Messwert $(L_B)_{\text{mess}}$	399	13 071	34 471
	Emissionsgrenzwert L_B'	100	10 000	4 000 000
Netzhaut thermisch	Messwert $(L_R)_{\text{mess}}$	19 288	19 288	47 586
	Emissionsgrenzwert L_R'	4 307 692	4 307 692	10 923 077

Fazit:

Photochemische Netzhautgefährdung: ja
 Thermische Netzhautgefährdung: nein
 Einstufung: Risikogruppe 2
 Maximal zulässige Expositionsdauer t_{max} : 29 s

Rotlicht emittierende LED HP 803 NR

Die Beleuchtungsstärke E_v in 20 cm Entfernung beträgt 581 lx.

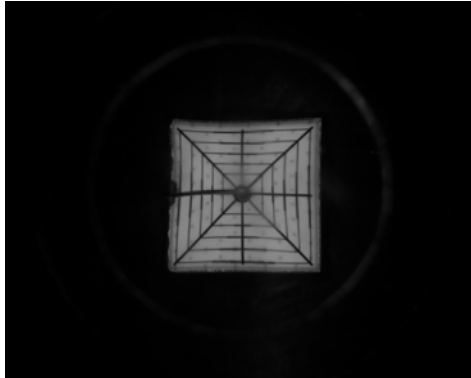


Abb. B 8.4 LED HP 803 NR - scheinbare Quelle

Größe der scheinbaren Quelle	$d = 1,6 \text{ mm}$
Winkelausdehnung der scheinbaren Quelle	$\alpha = 8,0 \text{ mrad}$

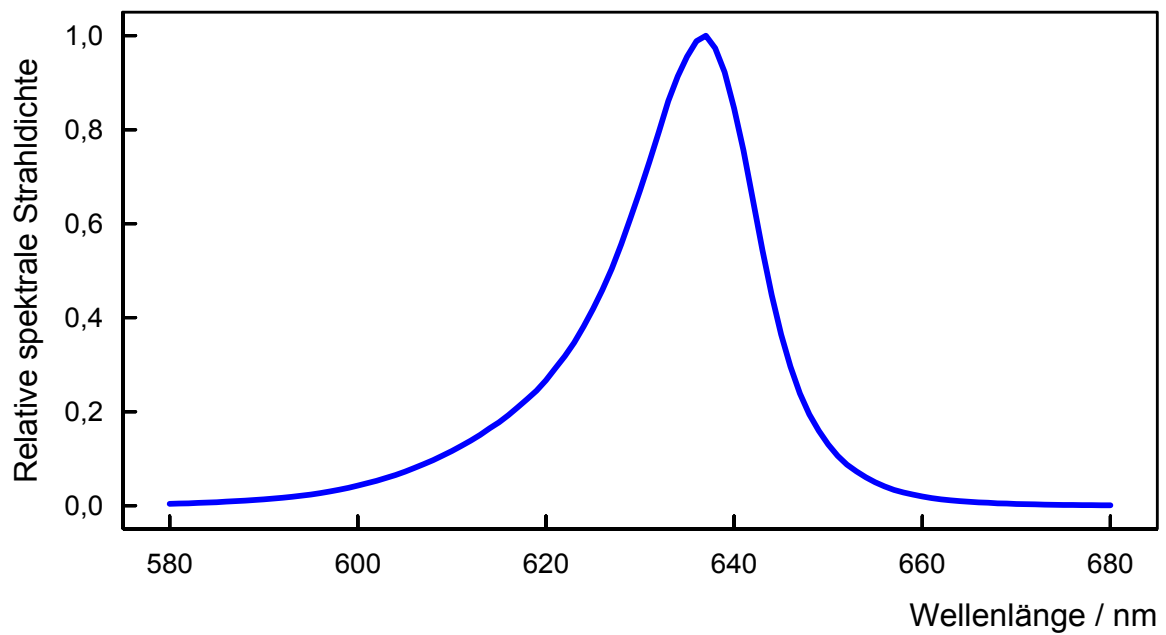


Abb. B 8.5 Relative spektrale Strahlidichte der LED HP 803 NR

Tab. B 8.2 Messwerte der effektiven Strahldichte $(L_B)_{\text{mess}}$ für die photochemische und $(L_R)_{\text{mess}}$ für die thermische Netzhautgefährdung der LED HP 803 NR sowie die dazugehörigen Emissionsgrenzwerte nach der Lampensicherheitsnorm

Gefährdung	Effektive Strahldichte/ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$	Freie Gruppe	Risiko- gruppe 1	Risiko- gruppe 2
Netzhaut photochemisch	Messwert $(L_B)_{\text{mess}}$	0	1	1
	Emissionsgrenzwert L_B'	100	10 000	4 000 000
Netzhaut thermisch	Messwert $(L_R)_{\text{mess}}$	23 583	23 583	49 647
	Emissionsgrenzwert L_R'	3 500 000	3 500 000	8 875 000

Fazit:

Photochemische Netzhautgefährdung: nein
 Thermische Netzhautgefährdung: nein
 Einstufung: Freie Gruppe

B 9 Z-Power-LED P7 (Seoul)

Weißlicht emittierende LED W724C0 (kaltweiß)

Die Abbildung B 9.1 zeigt eine LED W724C0 von der Firma Seoul. Diese LED besteht aus vier Chips. Die Farbtemperatur beträgt 5 600 K. Die LED wurde mit einer Stromstärke von 1,4 A betrieben. In 20 cm Entfernung von der LED wurde die Beleuchtungsstärke E_v von 2 223 lx gemessen.

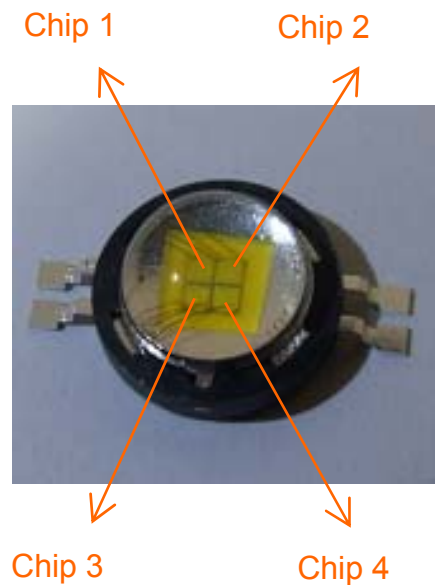


Abb. B 9.1 Eine LED W724C0 (Seoul)

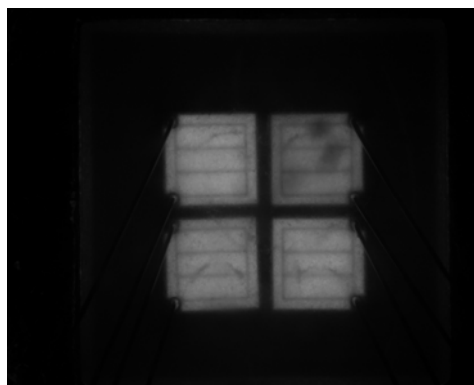


Abb. B 9.2 LED W724C0 - scheinbare Quelle

Größe der scheinbaren Quelle	$d = 2,7 \text{ mm}$
Winkelausdehnung der scheinbaren Quelle	$\alpha = 13,5 \text{ mrad}$

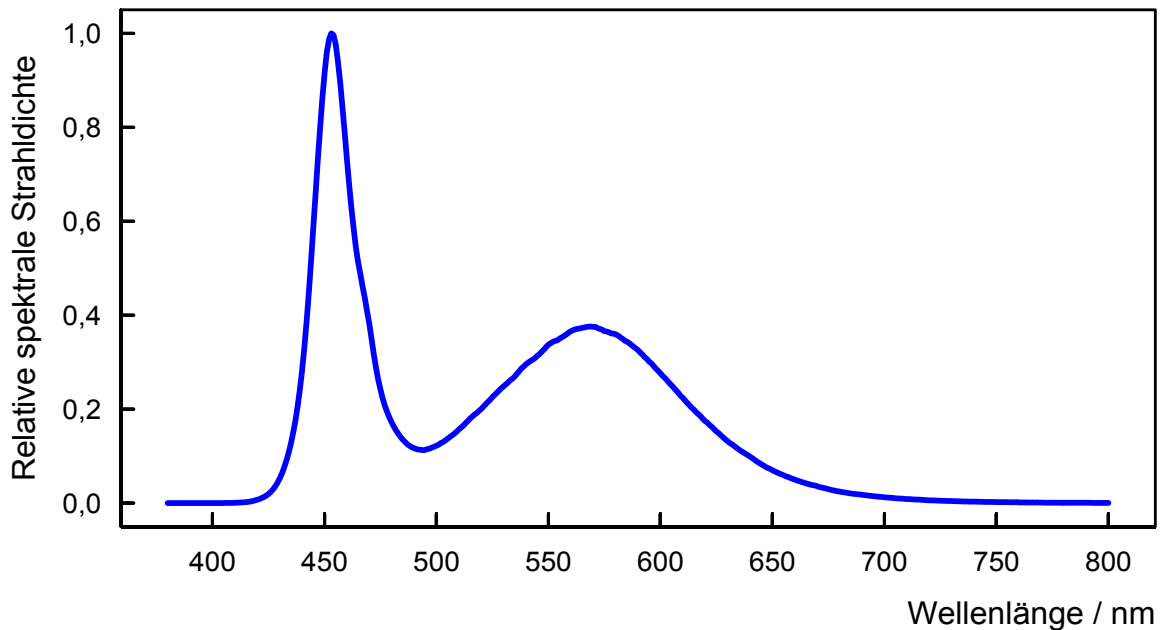


Abb. B 9.3 Relative spektrale Strahlidichte der LED W724C0

Tab. B 9.1 Messwerte der effektiven Strahlidichte $(L_B)_{\text{mess}}$ für die photochemische und $(L_R)_{\text{mess}}$ für die thermische Netzhautgefährdung der LED W724C0 sowie die dazugehörigen Emissionsgrenzwerte nach der Lampensicherheitsnorm. Bei den Messungen mit dem Empfangswinkel γ von 1,7 mrad (Risikogruppe 2) wurde auf einzelne Chips fokussiert.

Gefährdung	Effektive Strahlidichte/ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$	Freie Gruppe	Risiko- gruppe 1	Risiko- gruppe 2
Netzhaut photochemisch	Messwert $(L_B)_{\text{mess}}$	501	11 091	Chip 1 15 628 Chip 2 16 445 Chip 3 20 429 Chip 4 18 013
	Emissionsgrenzwert L_B'	100	10 000	4 000 000
Netzhaut thermisch	Messwert $(L_R)_{\text{mess}}$	33 413	33 413	Chip 1 48 413 Chip 2 49 011 Chip 3 61 627 Chip 4 56 505
	Emissionsgrenzwert L_R'	2 074 074	2 074 074	5 259 259

Fazit:

Photochemische Netzhautgefährdung:	ja
Thermische Netzhautgefährdung:	nein
Einstufung:	Risikogruppe 2
Maximal zulässige Expositionsdauer t_{\max} :	49 s

B 10 LED-Taschenlampen (Zweibrüder)

LED-Taschenlampe Lenser T7

Abbildung B 10.1 zeigt eine LED-Taschenlampe des Typs Lenser T7 der Firma Zweibrüder. Diese LED-Taschenlampe wird mit vier AAA Batterien betrieben (Spannung 6 V). Die Beleuchtungsstärke E_v in 20 cm Entfernung beträgt 104 700 lx.



Abb. B 10.1 LED-Taschenlampe Lenser T7 (Zweibrüder)

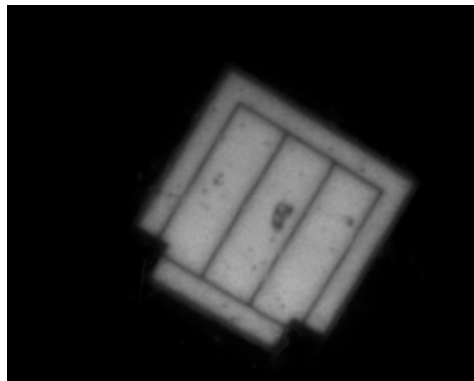


Abb. B 10.2 LED-Taschenlampe Lenser T7 - scheinbare Quelle

Größe der scheinbaren Quelle	$d = 3,4 \text{ mm}$
Winkelausdehnung der scheinbaren Quelle	$\alpha = 17,0 \text{ mrad}$

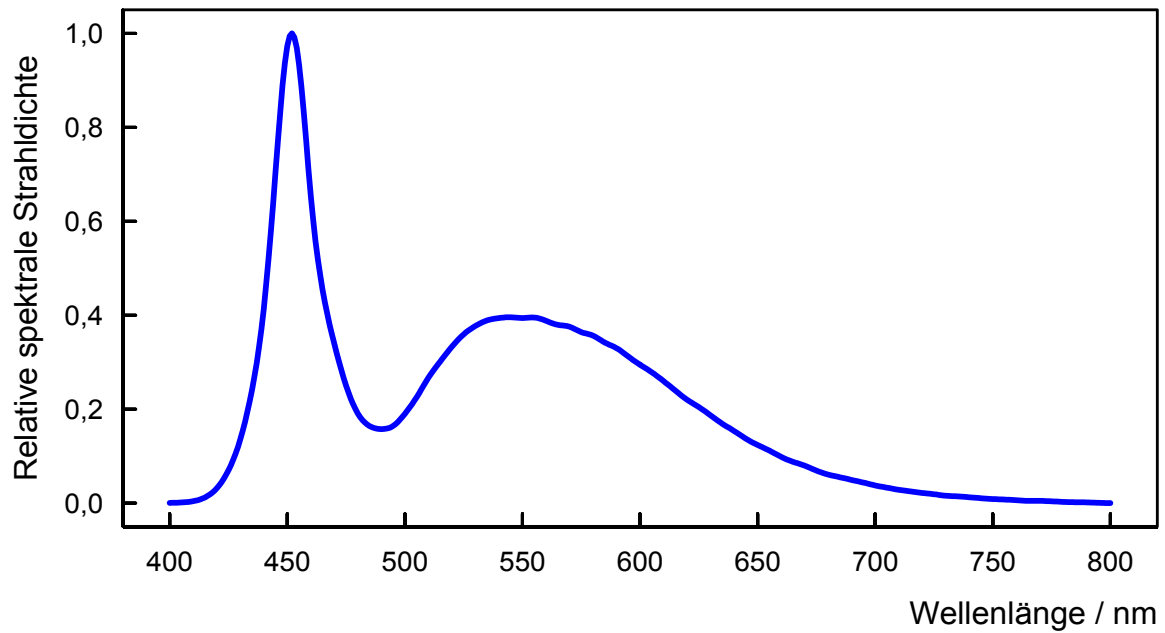


Abb. B 10.3 Relative spektrale Strahlidichte der LED-Taschenlampe Lenser T7

Tab. B 10.1 Messwerte der effektiven Strahlidichte $(L_B)_{\text{mess}}$ für die photochemische und $(L_R)_{\text{mess}}$ für die thermische Netzhautgefährdung der LED-Taschenlampe Lenser T7 sowie die dazugehörigen Emissionsgrenzwerte nach der Lampensicherheitsnorm

Gefährdung	Effektive Strahlidichte/ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$	Freie Gruppe	Risiko- gruppe 1	Risiko- gruppe 2
Netzhaut photochemisch	Messwert $(L_B)_{\text{mess}}$	788	19 344	23 169
	Emissionsgrenzwert L_B'	100	10 000	4 000 000
Netzhaut thermisch	Messwert $(L_R)_{\text{mess}}$	57 729	57 729	67 823
	Emissionsgrenzwert L_R'	1 588 236	1 588 236	4 176 471

Fazit:

Photochemische Netzhautgefährdung: ja
 Thermische Netzhautgefährdung: nein
 Einstufung: Risikogruppe 2
 Maximal zulässige Expositionsdauer t_{max} : 43 s

LED-Lenser X21

Abbildung B 10.4 zeigt eine LED-Taschenlampe des Typs Lenser X21 der Firma Zweibrüder. Diese LED-Taschenlampe wird mit vier 1.5 V-R20 Batterien betrieben (Spannung 6 V). Die LED-Taschenlampe hat sieben Chips. Bei den Messungen wurde auf einen Chip fokussiert. In 20 cm Entfernung von der LED wurde die Beleuchtungsstärke E_v von 38 100 lx gemessen.



Abb. B 10.4 LED-Taschenlampe Lenser X21 (Zweibrüder)

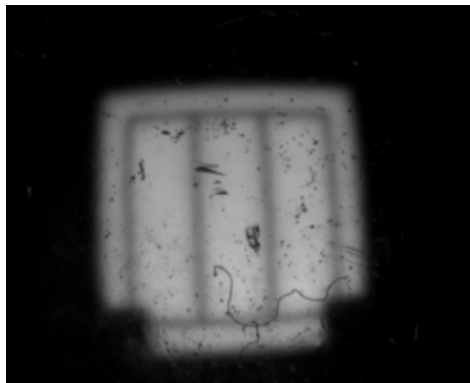


Abb. B 10.5 LED-Taschenlampe Lenser X21 - scheinbare Quelle

Größe der scheinbaren Quelle	$d = 3,4 \text{ mm}$
Winkelausdehnung der scheinbaren Quelle	$\alpha = 17,0 \text{ mrad}$

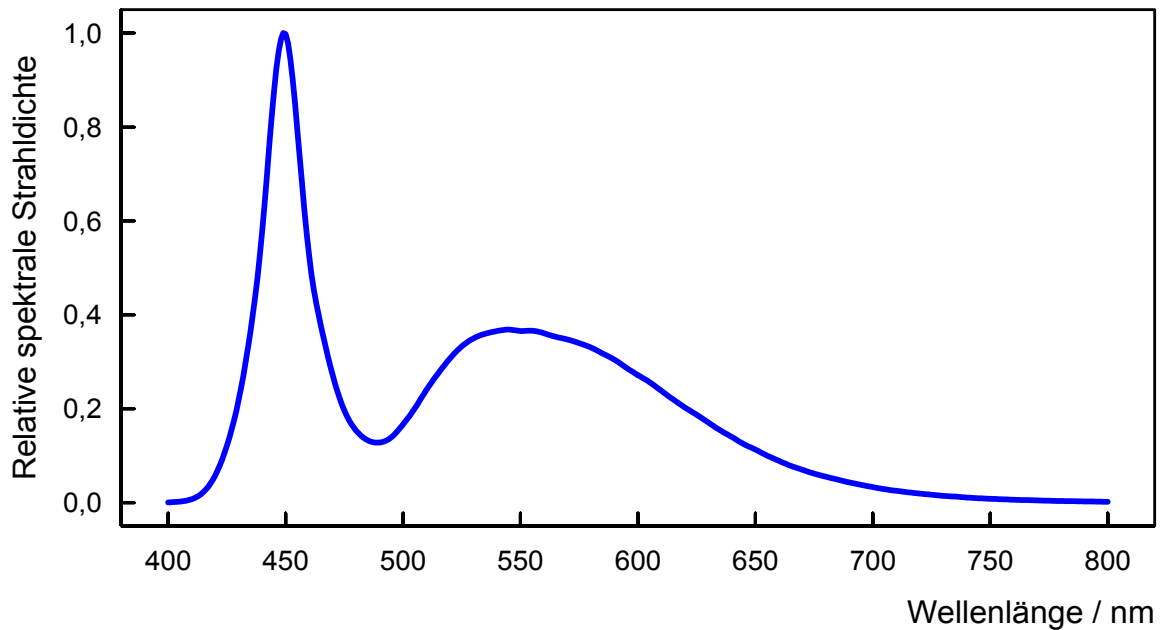


Abb. B 10.6 Relative spektrale Strahllichte der LED-Taschenlampe Lenser X21

Tab. B 10.2 Messwerte der effektiven Strahllichte $(L_B)_{\text{mess}}$ für die photochemische und $(L_R)_{\text{mess}}$ für die thermische Netzhautgefährdung der LED-Taschenlampe Lenser X21 sowie die dazugehörigen Emissionsgrenzwerte nach der Lampensicherheitsnorm

Gefährdung	Effektive Strahllichte/ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$	Freie Gruppe	Risiko- gruppe 1	Risiko- gruppe 2
Netzhaut photochemisch	Messwert $(L_B)_{\text{mess}}$	987	17 882	21 857
	Emissionsgrenzwert L_B'	100	10 000	4 000 000
Netzhaut thermisch	Messwert $(L_R)_{\text{mess}}$	54 436	54 436	65 414
	Emissionsgrenzwert L_R'	1 588 236	1 588 236	4 176 471

Fazit:

Photochemische Netzhautgefährdung: ja
 Thermische Netzhautgefährdung: nein
 Einstufung: Risikogruppe 2
 Maximal zulässige Expositionsdauer t_{max} : 46 s

LED-Taschenlampe Lenser v²

Abbildung B 0.7 zeigt eine LED-Taschenlampe des Typs Lenser v² der Firma Zweibrüder. Diese LED-Taschenlampe wird mit einem Akku betrieben (Spannung 3,7 V, Stromstärke 0,7 A). Die Beleuchtungsstärke E_v in 20 cm Entfernung beträgt 11 900 lx.



Abb. B 10.7 LED-Taschenlampe Lenser v² (Zweibrüder)

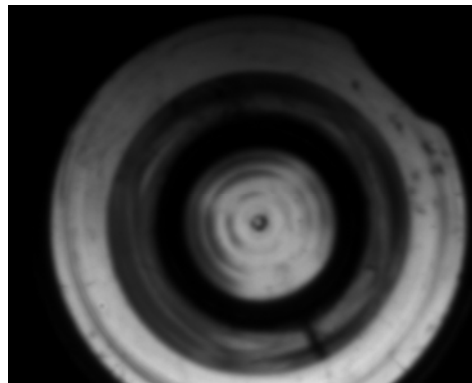


Abb. B 10.8 LED-Taschenlampe Lenser v² - scheinbare Quelle

Größe der scheinbaren Quelle	$d = 12,6 \text{ mm}$
Winkelausdehnung der scheinbaren Quelle	$\alpha = 63,0 \text{ mrad}$

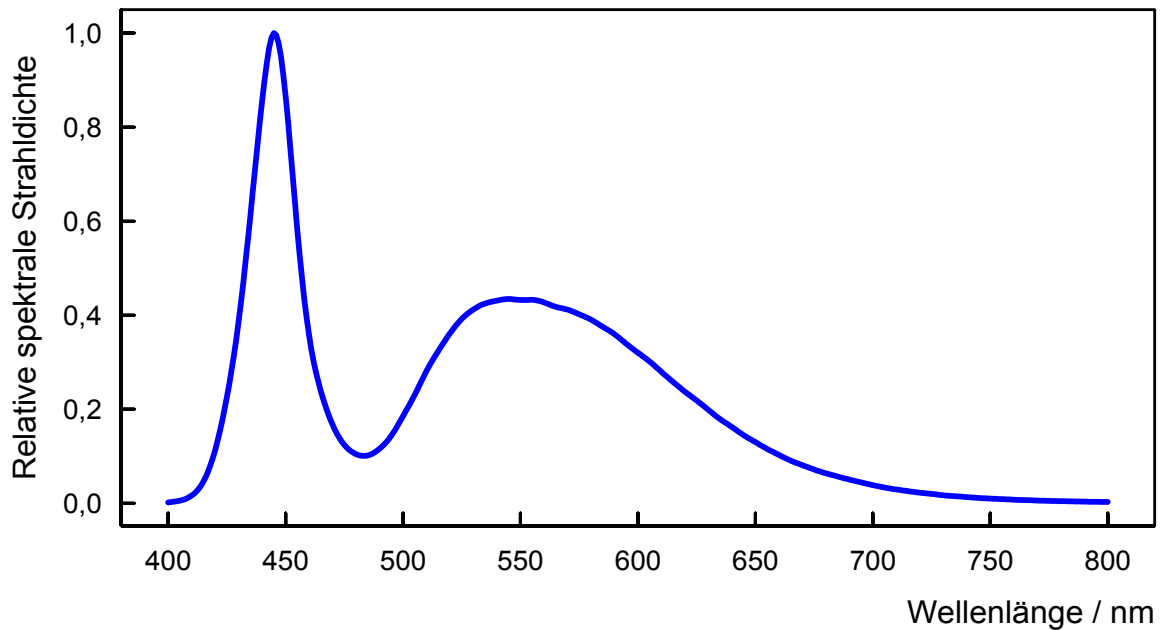


Abb. B 10.9 Relative spektrale Strahlidichte der LED-Taschenlampe Lenser v²

Tab. B 10.3 Messwerte der effektiven Strahlidichte $(L_B)_{\text{mess}}$ für die photochemische und $(L_R)_{\text{mess}}$ für die thermische Netzhautgefährdung der LED-Taschenlampe Lenser v² sowie die dazugehörigen Emissionsgrenzwerte nach der Lampensicherheitsnorm

Gefährdung	Effektive Strahlidichte/ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$	Freie Gruppe	Risiko- gruppe 1	Risiko- gruppe 2
Netzhaut photochemisch	Messwert $(L_B)_{\text{mess}}$	1 518	5 475	5 667
	Emissionsgrenzwert L_B'	100	10 000	4 000 000
Netzhaut thermisch	Messwert $(L_R)_{\text{mess}}$	16 388	16 388	16 620
	Emissionsgrenzwert L_R'	444 444	444 444	1 126 984

Fazit:

Photochemische Netzhautgefährdung: ja
 Thermische Netzhautgefährdung: nein
 Einstufung: Risikogruppe 1
 Maximal zulässige Expositionsdauer t_{max} : 183 s

B 11 LED-Lampen MR-16, 3 W (Omnilux)

Abbildung B 11.1 zeigt eine LED-Lampe des Typs MR-16 der Firma Omnilux. MR steht für *multifaceted reflector* (auf Deutsch: Multifacetten-Reflektor). Die MR-16 kommt sowohl bei LED-Lampen als auch bei Halogenlampen vor. Bei der LED-Version fehlt oft der typische Multifacetten-Reflektor. Die meisten MR-16-Lampen sind mit einem GU5.3-Stiftsockel für 12 Volt gefertigt.



Abb. B 11.1 Eine LED-Lampe des Typs MR-16 der Firma Omnilux

Blaulicht emittierende LED-Lampe MR-16

Die Beleuchtungsstärke in 20 cm Entfernung beträgt 298 lx.

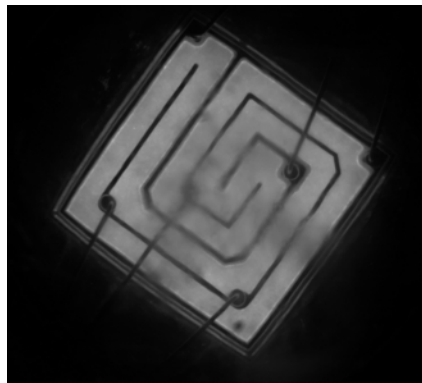


Abb. B 11.2 Omnilux-Lampe MR-16 blau - scheinbare Quelle

Größe der scheinbaren Quelle	$d = 4,3 \text{ mm}$
Winkelausdehnung der scheinbaren Quelle	$\alpha = 21,5 \text{ mrad}$

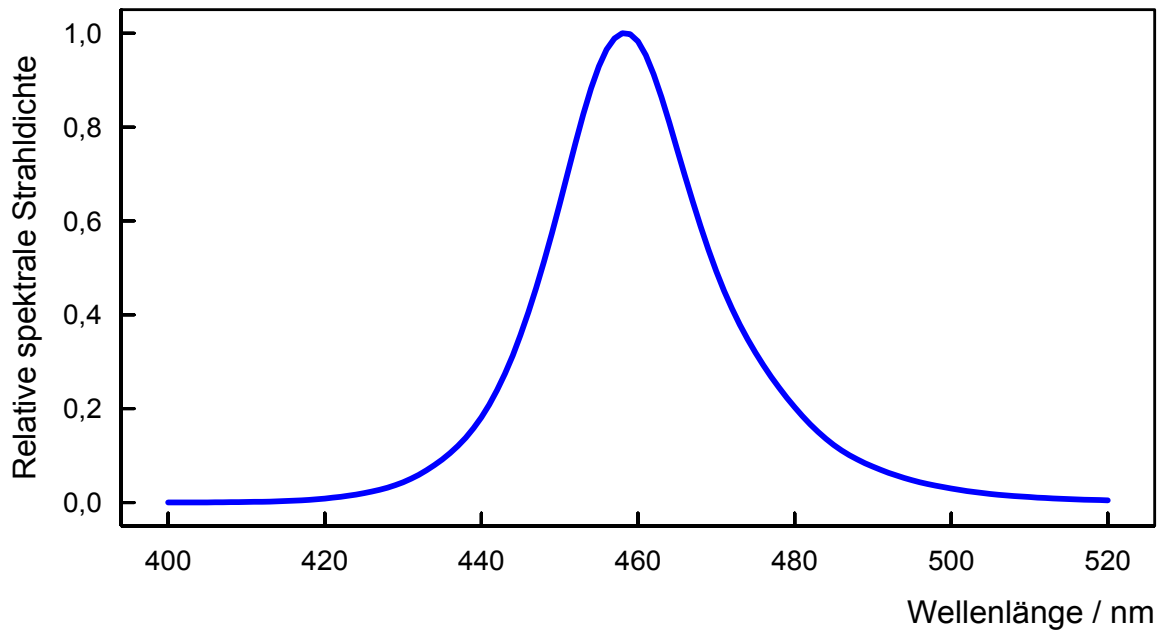


Abb. B 11.3 Relative spektrale Strahllichte der Omnilux-Lampe MR-16 blau

Tab. B 11.1 Messwerte der effektiven Strahllichte $(L_B)_{\text{mess}}$ für die photochemische und $(L_R)_{\text{mess}}$ für die thermische Netzhautgefährdung der LED-Lampe MR-16 blau (Omnilux) sowie die dazugehörigen Emissionsgrenzwerte nach der Lampensicherheitsnorm

Gefährdung	Effektive Strahllichte/ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$	Freie Gruppe	Risiko- gruppe 1	Risiko- gruppe 2
Netzhaut photochemisch	Messwert $(L_B)_{\text{mess}}$	1 175	12 293	13 717
	Emissionsgrenzwert L_B'	100	10 000	4 000 000
Netzhaut thermisch	Messwert $(L_R)_{\text{mess}}$	16 043	16 043	17 770
	Emissionsgrenzwert L_R'	1 302 326	1 302 326	3 302 326

Fazit:

Photochemische Netzhautgefährdung: ja
 Thermische Netzhautgefährdung: nein
 Einstufung: Risikogruppe 2
 Maximal zulässige Expositionsdauer t_{max} : 73 s

Gelblicht emittierende LED-Lampe MR-16

Die Beleuchtungsstärke E_v in 20 cm Entfernung beträgt 716 lx.

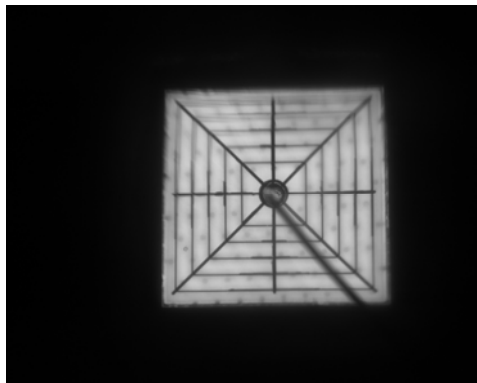


Abb. B 11.4 Omnilux-Lampe MR-16 gelb - scheinbare Quelle

Größe der scheinbaren Quelle $d = 3,3 \text{ mm}$
 Winkelausdehnung der scheinbaren Quelle $\alpha = 16,5 \text{ mrad}$

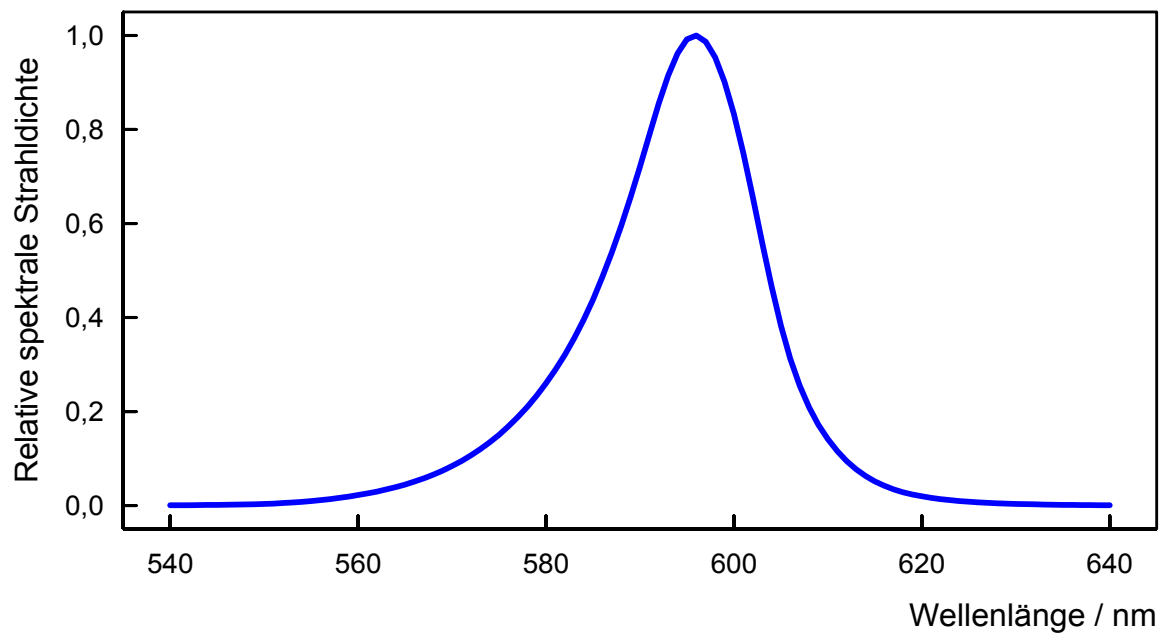


Abb. B 11.5 Relative spektrale Strahlidichte der Omnilux-Lampe MR-16 gelb

Tab. B 11.2 Messwerte der effektiven Strahldichte $(L_B)_{\text{mess}}$ für die photochemische und $(L_R)_{\text{mess}}$ für die thermische Netzhautgefährdung der LED-Lampe MR-16 gelb (Omnilux) sowie die dazugehörigen Emissionsgrenzwerte nach der Lampensicherheitsnorm

Gefährdung	Effektive Strahldichte/ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$	Freie Gruppe	Risiko- gruppe 1	Risiko- gruppe 2
Netzhaut photochemisch	Messwert $(L_B)_{\text{mess}}$	1	13	14
	Emissionsgrenzwert L_B'	100	10 000	4 000 000
Netzhaut thermisch	Messwert $(L_R)_{\text{mess}}$	8 718	8 718	8 866
	Emissionsgrenzwert L_R'	1 696 970	1 696 970	4 303 030

Fazit:

Photochemische Netzhautgefährdung: nein
 Thermische Netzhautgefährdung: nein
 Einstufung: Freie Gruppe

Grünlicht emittierende LED-Lampe MR-16

In 20 cm Entfernung von der LED wurde die Beleuchtungsstärke E_v von 1 701 lx gemessen.

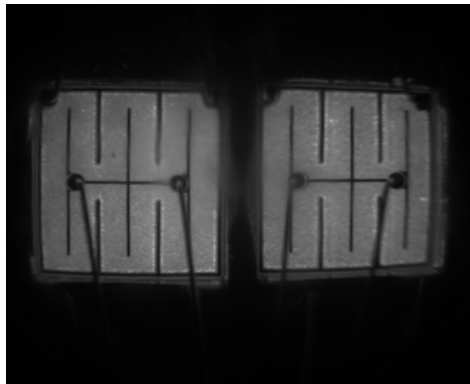


Abb. B 11.6 Omnilux-Lampe MR-16 grün - scheinbare Quelle

Größe der scheinbaren Quelle $d = 6,5 \text{ mm}$
 Winkelausdehnung der scheinbaren Quelle $\alpha = 32,5 \text{ mrad}$

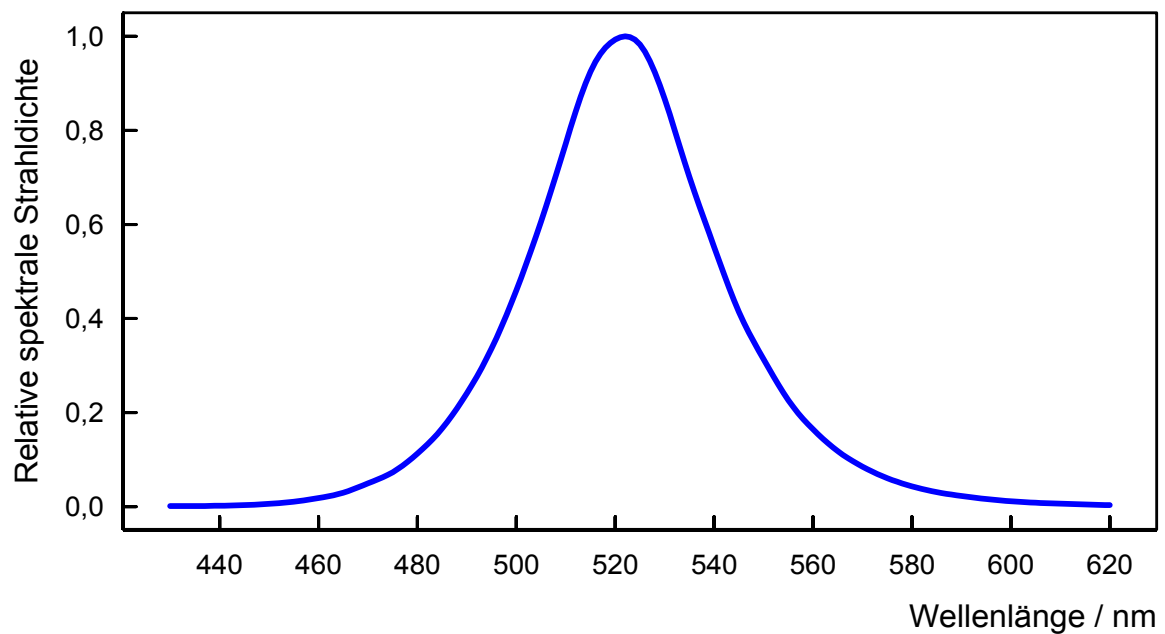


Abb. B 11.7 Relative spektrale Strahlendichte der Omnilux-Lampe MR-16 grün

Tab. B 11.3 Messwerte der effektiven Strahldichte $(L_B)_{\text{mess}}$ für die photochemische und $(L_R)_{\text{mess}}$ für die thermische Netzhautgefährdung der LED-Lampe MR-16 grün (Omnilux) sowie die dazugehörigen Emissionsgrenzwerte nach der Lampensicherheitsnorm

Gefährdung	Effektive Strahldichte/ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$	Freie Gruppe	Risiko- gruppe 1	Risiko- gruppe 2
Netzhaut photochemisch	Messwert $(L_B)_{\text{mess}}$	62	739	1 024
	Emissionsgrenzwert L_B'	100	10 000	4 000 000
Netzhaut thermisch	Messwert $(L_R)_{\text{mess}}$	10 435	10 435	12 629
	Emissionsgrenzwert L_R'	861 538	861 538	2 184 615

Fazit:

Photochemische Netzhautgefährdung: nein
 Thermische Netzhautgefährdung: nein
 Einstufung: Freie Gruppe

Rotlicht emittierende LED-Lampe MR-16

Die Beleuchtungsstärke E_v in 20 cm Entfernung beträgt 1 535 lx.

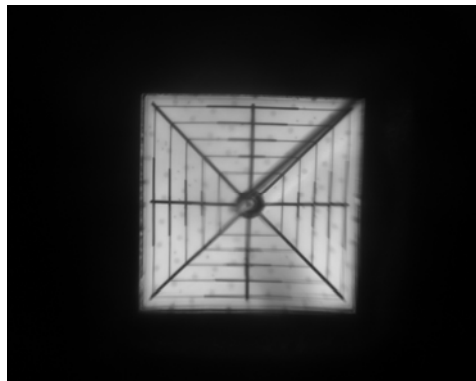


Abb. B 11.8 Omnilux-Lampe MR-16 rot - scheinbare Quelle

Größe der scheinbaren Quelle	$d = 3,3 \text{ mm}$
Winkelausdehnung der scheinbaren Quelle	$\alpha = 16,5 \text{ mrad}$

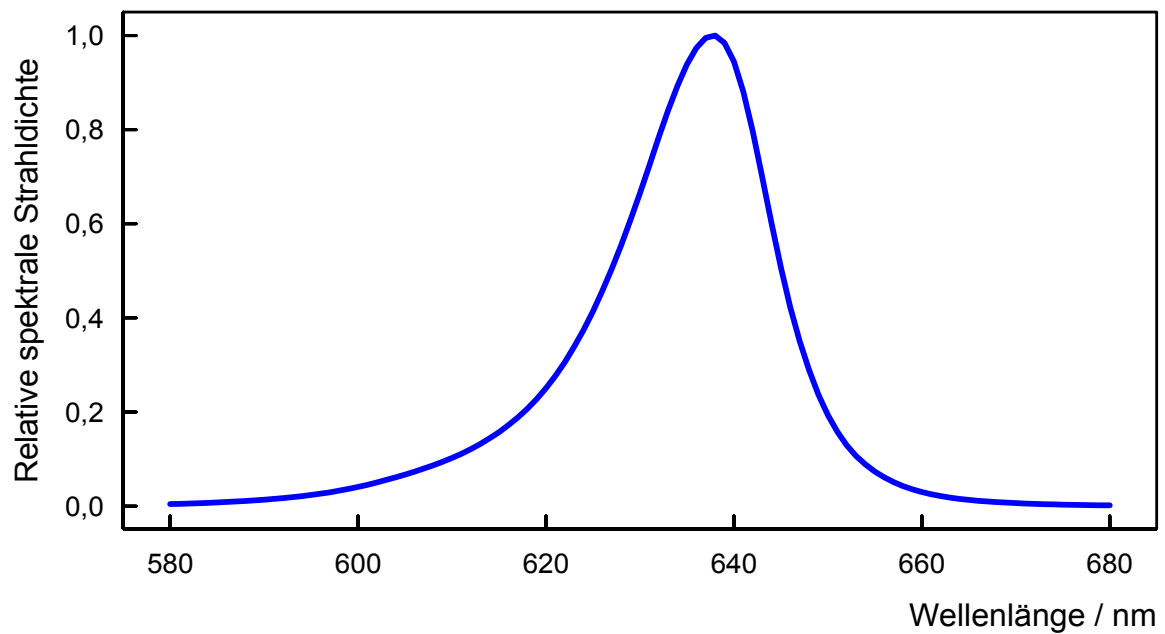


Abb. B 11.9 Relative spektrale Strahlidichte der Omnilux-Lampe MR-16 rot

Tab. B 11.4 Messwerte der effektiven Strahldichte $(L_B)_{\text{mess}}$ für die photochemische und $(L_R)_{\text{mess}}$ für die thermische Netzhautgefährdung der LED-Lampe MR-16 rot (Omnilux) sowie die dazugehörigen Emissionsgrenzwerte nach der Lampensicherheitsnorm

Gefährdung	Effektive Strahldichte/ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$	Freie Gruppe	Risiko- gruppe 1	Risiko- gruppe 2
Netzhaut photochemisch	Messwert $(L_B)_{\text{mess}}$	0	1	1
	Emissionsgrenzwert L_B'	100	10 000	4 000 000
Netzhaut thermisch	Messwert $(L_R)_{\text{mess}}$	40 692	40 692	41 848
	Emissionsgrenzwert L_R'	1 696 970	1 696 970	4 303 030

Fazit:

Photochemische Netzhautgefährdung: nein
 Thermische Netzhautgefährdung: nein
 Einstufung: Freie Gruppe

Weißlicht emittierende LED-Lampe MR-16 (warmweiß)

Laut Herstellerangaben beträgt die Farbtemperatur dieser LED-Lampe 3 000 K. In 20 cm Entfernung von der LED wurde eine Beleuchtungsstärke E_v von 969 lx gemessen.

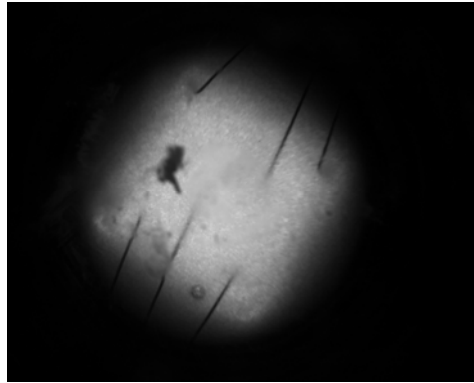


Abb. B 11.10 Omnilux-Lampe MR-16 warmweiß - scheinbare Quelle

Größe der scheinbaren Quelle $d = 4,8 \text{ mm}$
 Winkelausdehnung der scheinbaren Quelle $\alpha = 24,0 \text{ mrad}$

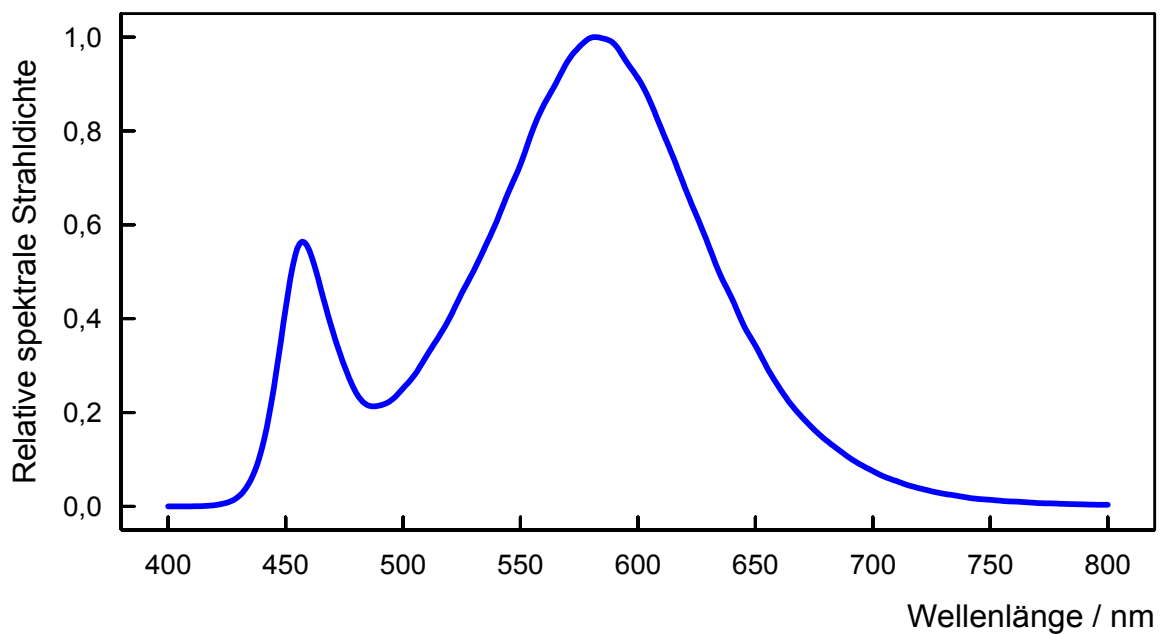


Abb. B 11.11 Relative spektrale Strahldichte der Omnilux-Lampe MR-16 warmweiß

Tab. B 11.5 Messwerte der effektiven Strahldichte $(L_B)_{\text{mess}}$ für die photochemische und $(L_R)_{\text{mess}}$ für die thermische Netzhautgefährdung der LED-Lampe MR-16 warmweiß (Omnilux) sowie die dazugehörigen Emissionsgrenzwerte nach der Lampensicherheitsnorm

Gefährdung	Effektive Strahldichte/ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$	Freie Gruppe	Risiko- gruppe 1	Risiko- gruppe 2
Netzhaut photochemisch	Messwert $(L_B)_{\text{mess}}$	72	553	603
	Emissionsgrenzwert L_B'	100	10 000	4 000 000
Netzhaut thermisch	Messwert $(L_R)_{\text{mess}}$	5 408	5 408	5 690
	Emissionsgrenzwert L_R'	1 166 667	1 166 667	2 958 333

Fazit:

Photochemische Netzhautgefährdung: nein
 Thermische Netzhautgefährdung: nein
 Einstufung: Freie Gruppe

B 12 LED-Reflektor 3 W (Paulmann)

Abbildung B 12.1 zeigt einen LED-Reflektor des Typs 280.53 der Firma Paulmann. Laut Herstellerangaben beträgt die Farbtemperatur 6 000 - 7 000 K (Tageslicht). Der Reflektor ist mit einem GU5.3-Stiftsockel für 12 Volt gefertigt. Die Beleuchtungsstärke E_v in 20 cm Entfernung beträgt 1 045 lx.



Abb. B 12.1 Ein LED-Reflektor des Typs 280.53 (Paulmann)

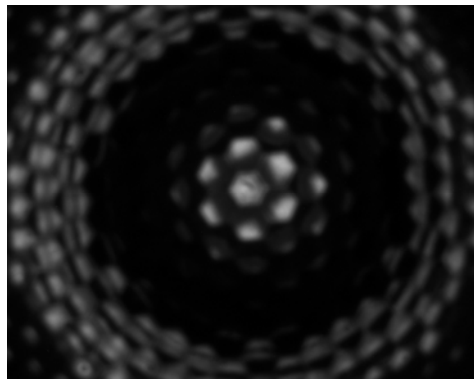


Abb. B 12.2 LED-Reflektor des Typs 280.53 - scheinbare Quelle

Größe der scheinbaren Quelle	$d = 14,6 \text{ mm}$
Winkelausdehnung der scheinbaren Quelle	$\alpha = 73,0 \text{ mrad}$

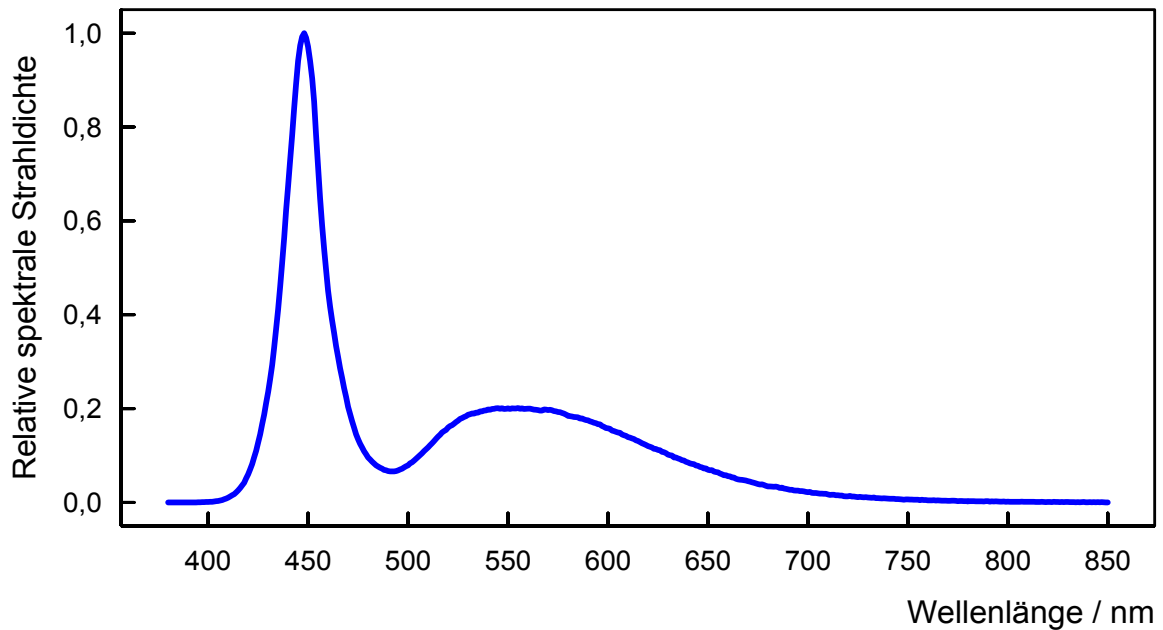


Abb. B 12.3 Relative spektrale Strahlidichte des LED-Reflektors 280.53

Tab. B 12.1 Messwerte der effektiven Strahlidichte $(L_B)_{\text{mess}}$ für die photochemische und $(L_R)_{\text{mess}}$ für die thermische Netzhautgefährdung des LED-Reflektors 280.53 sowie die dazugehörigen Emissionsgrenzwerte nach der Lampensicherheitsnorm

Gefährdung	Effektive Strahlidichte/ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$	Freie Gruppe	Risiko- gruppe 1	Risiko- gruppe 2
Netzhaut photochemisch	Messwert $(L_B)_{\text{mess}}$	1 235	5 289	17 134
	Emissionsgrenzwert L_B'	100	10 000	4 000 000
Netzhaut thermisch	Messwert $(L_R)_{\text{mess}}$	14 091	14 091	37 649
	Emissionsgrenzwert L_R'	383 562	383 562	972 603

Fazit:

Photochemische Netzhautgefährdung: ja
 Thermische Netzhautgefährdung: nein
 Einstufung: Risikogruppe 1
 Maximal zulässige Expositionsdauer t_{max} : 189 s